

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
DINÁMICO DE UN VEHÍCULO EN CARSIM

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor:

D.IVÁN MATAMOROS CANSECO

Tutora:

Dra.Dña BEATRIZ LÓPEZ BOADA

# RESUMEN DEL PROYECTO

---

El objetivo del actual proyecto consiste en simular el comportamiento dinámico de un vehículo mediante softwares informáticos. Se modela el vehículo y se analiza su comportamiento a lo largo de una serie de movimientos, los cuales se han realizado de manera previa con un vehículo real. El control, el modelado del vehículo y el entorno se realiza mediante el programa *CarSim*.

*CarSim* permite simular y controlar el comportamiento dinámico de un vehículo al que se le aplican una serie de movimientos. Una de las grandes cualidades del programa es la posibilidad de implementarse con programas externos. En este proyecto se combina dicho programa con la extensión de *Matlab; Simulink*,

La medición de los valores obtenidos en las pruebas se realiza mediante el sistema *VBOX*. Este, es un potente sistema basado en tecnología GPS para la medición y registro del comportamiento dinámico del vehículo en movimiento. Las variables medidas por el equipo son: la velocidad longitudinal, el steering, el ángulo de deslizamiento, la velocidad de guiñada o Yaw Rate y la aceleración lateral del vehículo. La simulación tiene una duración de 410 segundos, en los cuales se obtienen valores de las variables indicadas cada 0.5 segundos.

El control de la simulación se realiza mediante las variables del steering y la velocidad longitudinal del vehículo., así mismo la velocidad de guiñada, la aceleración lateral y el ángulo de deslizamiento se emplean para el análisis de los resultados obtenidos y su posterior comparación. El vehículo estudiado es un Toyota Prius el cual ha sido cedido por la marca automovilística para la realización de los experimentos realizados. Para verificar el comportamiento del vehículo, se realizan múltiples pruebas recreando situaciones reales durante la conducción del mismo.

Se finaliza este proyecto, comparando los resultados obtenidos de las diferentes variables estudiadas, así como las posibles mejoras de la simulación realizada para poder simular el comportamiento de dicho vehículo sin tener que realizar experimentos de manera real de nuevo.

# AGRADECIMIENTOS

---

Llegando a este momento tan ansiado, con el que en ocasiones he soñado, solo me queda agradecer:

A toda mi familia al completo, por su constante apoyo y dedicación a lo largo de estos años. En especial a mis padres y a mi hermana por estar siempre junto a mí y enseñarme a no rendirme nunca. Sé que siempre me están apoyando y nunca podré agradecerles lo suficiente.

A mis amigos de toda la vida, a los que considero mis hermanos, por ser ese apoyo indispensable en las ocasiones en que las fuerzas flaqueaban.

A mi grupo de la Universidad, gracias a ellos que siempre me recordaban las fechas de las prácticas. Sin olvidarme de los buenos momentos vividos en la biblioteca.

A mi tutora, gracias por acogerme y solucionarme el problema que tenía encima.

A mis compañeros de trabajo, que ya más que compañeros los considero amigos. En especial a mi ex tutor por su constante apoyo durante estos dos últimos años de carrera.

A Alba gracias por apoyarme siempre, tanto en los momentos buenos como en los malos. Por siempre confiar en mí y animarme a realizar todo lo que me proponga.

Gracias a todos por el apoyo y la implicación realizada durante toda mi época de formación.

A todos vosotros, de todo corazón, mil gracias...

# INDICE DE CONTENIDOS

---

<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1. OBJETIVO	2
1.2. MOTIVACIÓN	3
1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO	3
<b>CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE</b>	6
2.1. SISTEMAS DINÁMICOS	7
2.2. MODELO MATEMÁTICO	9
<b>CAPITULO III: MODELO Y SENSORIZACIÓN DEL VEHÍCULO</b>	11
3.1. DEFINICIÓN DEL VEHÍCULO DE ESTUDIO	11
3.2. DATOS TÉCNICOS	13
3.2. SISTEMA DE MEDICIÓN VBOX	18
3.2.1. VBOX 3i DUAL ANTENNA	19
3.2.2. VBOX YAW RATE SENSOR	21
3.3. SENSORIZACIÓN DEL VEHÍCULO	22
<b>CAPITULO IV: PARÁMETROS DE ESTUDIO</b>	27
4.1. COMPORTAMIENTO DIRECCIONAL DE UN VEHÍCULO	28
4.2. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS	29
4.2.1. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE SALIDA	30
4.2.1.1. VELOCIDAD DE GUIÑADA	30
4.2.1.2. ANGULO DE DESLIZAMIENTO	31
4.2.1.3. ACELERACIÓN LATERAL	33
<b>CAPÍTULO V: MÉTODO EXPERIMENTAL</b>	34
5.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS VARIABLES OBTENIDAS	34
<b>CAPITULO VI: SIMULACIÓN MEDIANTE CARSIM</b>	38
6.2. IMPLEMENTACIÓN A TRAVÉS DE CARSIM	39
6.3. SOFTWARE SIMULINK	48
6.4 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	50
<b>CAPITULO VII: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b>	52
7.1 CASOS DE ESTUDIO	53

7.1.1. CASO DE ESTUDIO 1 .....	55
7.1.2. CASO DE ESTUDIO 2 .....	68
7.1.3 CASO DE ESTUDIO 3 .....	80
7.4. DIFERENCIAS ENTRE LA PRUEBA REAL Y LA SIMULACIÓN REALIZADA .....	93
7.5. CÁLCULO DE ERRORES.....	95
<b>CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS .....</b>	<b>98</b>
8.1. CONCLUSIONES .....	98
8.2 TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES .....	101
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>102</b>

# INDICE DE TABLAS

---

Tabla 3.1: Datos genéricos del vehículo .....	12
Tabla 3.2: Características principales.....	14
Tabla 3.3: Características motor de combustión .....	15
Tabla 3.4: Características motor eléctrico .....	15
Tabla 3.5: Características sistema de transmisión.....	16
Tabla 3.6: Características dirección del vehículo .....	16
Tabla 3.7: Características sistema de suspensión.....	17
Tabla 3.8: Características sistema de frenado .....	17
Tabla 3.9: Características neumáticos vehículo .....	18
Tabla 4.1: Parámetros obtenidos mediante VBOX .....	29
Tabla 6.1: Dimensiones principales .....	41
Tabla 6.2: Momentos de inercia .....	41
Tabla 6.3: Radios de giro.....	42
Tabla 6.4: Datos aerodinámicos.....	42
Tabla 6.5: Características carretera .....	45
Tabla 7.1: Casos de estudio .....	53
Tabla 7.2: Caso 1 movimientos destacados.....	57
Tabla 7.3: Variables entrada intervalo [26.5-32] s.....	58
Tabla 7.4: Caso 2 movimientos destacados.....	70
Tabla 7.5: Variables de entrada intervalo [207.5-211] segundos.....	73
Tabla 7.6: Caso 3 movimientos destacados.....	82
Tabla 7.7: Errores obtenidos Caso 1 .....	96

Tabla 7.8: Errores obtenidos Caso 2 .....	97
Tabla 7.9: Errores obtenidos Caso 1 .....	97
Tabla 8.1: Acciones realizadas en Caso 1.....	99
Tabla 8.2: Acciones realizadas en Caso 2.....	99
Tabla 8.3: Acciones realizadas en Caso 3.....	100

# INDICE DE IMÁGENES

---

Imagen 3.1: Vehículo Toyota Prius 1.8 HSD ECO .....	11
Imagen 3.2: Sistema VBOX 3i Dual Antenna.....	19
Imagen 3.3: Antenas gemelas VBOX.....	20
Imagen 3.4: Sistema V-BOX Yaw Rate Sensor.....	21
Imagen 3.5: Vehículo sensorizado .....	22
Imagen 3.6: Entradas VBOX 3i DUAL ANTENNA .....	23
Imagen 3.7: Equipo VBOX 3i DUAL ANTENNA conectado al vehículo de estudio .....	24
Imagen 3.8: Conexionado VBOX 3i DUAL ANTENNA Y VBOX YAW RATE SENSOR .....	25
Imagen 3.9: antena VBOX .....	25
Imagen 3.10: ventosas amarre antena .....	25
Imagen 7.1: Giro brusco.....	57
Imagen 7.2: Cambio de sentido en rotonda. ....	61
Imagen 7.3: Giro en rotonda 90º .....	64
Imagen 7.4: Giro a derechas 90º .....	70
Imagen 7.5: Giro hacia izquierda 90º .....	73
Imagen 7.6: Paso por rotonda .....	76
Imagen 7.7: Giro rotonda 90º Caso 3.1 .....	82
Imagen 7.8: Giro rotonda 90º Caso 3.2 .....	85
Imagen 7.9: Giro hacia izquierda 90º Caso 3 .....	88



# INDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 5.1: Velocidad longitudinal prueba (km/h) .....	35
Gráfica 5.2: Steering vehículo prueba (deg) .....	35
Gráfica 5.3: Ángulo de deslizamiento prueba (deg) .....	36
Gráfica 5.4: Yaw Rate prueba (deg/s) .....	36
Gráfica 5.5: Aceleración lateral prueba (m/s <sup>2</sup> ) .....	37
Gráfica 6.1: Yaw Rate Simulación .....	50
Gráfica 6.2: Ángulo de deslizamiento Simulación .....	51
Gráfica 6.3: Aceleración lateral Simulación .....	51
Gráfica 7.1: Steering VBOX-Steering CarSim .....	54
Gráfica 7.2: Velocidad longitudinal VBOX-Velocidad longitudinal CarSim.....	54
Gráfica 7.3: Ángulo Steering caso de estudio 1 .....	56
Gráfica 7.4: Velocidad longitudinal del vehículo caso de estudio 1 .....	56
Gráfica 7.5: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [26.5-32] segundos.....	59
Gráfica 7.6: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [26.5-32] segundos.....	59
Gráfica 7.7: Comparación valores aceleración lateral VBOX con aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [26.5-32] segundos .....	60
Gráfica 7.8: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [44-71.5] segundos.....	62
Gráfica 7.9: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [44-71.5] segundos.....	62
Gráfica 7.10: Comparación valores de la aceleración lateral VBOX con la aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [44-71.5] segundos.....	63

Gráfica 7.11: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [88-134] segundos.....	64
Gráfica 7.12: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [88-134] segundos.....	65
Gráfica 7.13: Comparación valores de la aceleración lateral VBOX con la aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [88-134] segundos.....	65
Gráfica 7.14: Comparación Yaw Rate caso de estudio 1 .....	66
Gráfica 7.15: Comparación Ángulo de deslizamiento caso de estudio 1 .....	67
Gráfica 7.16: Comparación Aceleración lateral caso de estudio 1 .....	67
Gráfica 7.17: Ángulo Steering caso de estudio 2 .....	69
Gráfica 7.18: Velocidad longitudinal del vehículo caso de estudio 2 .....	69
Gráfica 7.19: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [150.5-165] segundos.....	71
Gráfica 7.20: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [150.5-165] segundos .....	71
Gráfica 7.21: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [150.5-165] segundos .....	72
Gráfica 7.22: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [195-212] segundos.....	74
Gráfica 7.23: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [195-212] segundos.....	74
Gráfica 7.24: Comparación valores aceleración lateral VBOX con aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [195-212] segundos .....	75
Gráfica 7.25: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [222-253] segundos.....	77
Gráfica 7.26: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [222-253] segundos.....	77

Gráfica 7.27: Comparación valores aceleración lateral VBOX con aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [222-253] segundo.....	78
Gráfica 7.28: Comparación Yaw Rate caso de estudio 2 .....	79
Gráfica 7.29: Comparación Ángulo de deslizamiento caso de estudio 2 .....	79
Gráfica 7.30: Comparación aceleración lateral caso de estudio 2 .....	80
Gráfica 7.31: Ángulo steering caso de estudio 3 .....	81
Gráfica 7.32: Velocidad longitudinal caso de estudio 3.....	81
Gráfica 7.33: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [285-326] segundos.....	83
Gráfica 7.34: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [285-326] segundos.....	83
Gráfica 7.35: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [285-326] segundos .....	84
Gráfica 7.36: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [335-366] segundos.....	86
Gráfica 7.37: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [335-366] segundos.....	86
Gráfica 7.38: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [335-366] segundos .....	87
Gráfica 7.39: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [393.5-405] segundos.....	89
Gráfica 7.40: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [393.5-405] segundos .....	89
Gráfica 7.41: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [393.5-405] segundos .....	90
Gráfica 7.42: Comparación Yaw Rate caso de estudio 3 .....	91
Gráfica 7.43: Comparación Ángulo de deslizamiento caso de estudio 3 .....	92

Gráfica 7.44: Comparación Aceleración lateral caso de estudio 3 .....	92
---	----

# INDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1: Diagrama de bloques de un Sistema dinámico.....	7
Figura 2.2: Sistema multicuerpo de la transmisión de un vehículo.....	7
Figura 2.3: Áreas de la dinámica vehicular .....	8
Figura 2.4: Vehículo simulado en CarSim .....	9
Figura 3.1: Dimensiones Toyota Prius 1.8 HSD ECO .....	13
Figura 3.2: Antenas instaladas para ángulo de deslizamiento sistema VBOX.....	20
Figura 3.3: Parámetros medición VBOX YAW RATE SENSOR.....	21
Figura 4.1: Diagrama de bloques del Sistema.....	27
Figura 4.2: Sistema de referencia en vehículo.....	28
Tabla 4.1: Parámetros obtenidos mediante VBOX .....	29
Figura 4.3: Sistema de ejes en un vehículo.....	30
Figura 4.5: Causa ángulo de deslizamiento .....	32
Figura 4.6: Comportamiento del vehículo en curva .....	32
Figura 6.1 Interfaz inicial CarSim .....	39
Figura 6.2: Apartado 1 CarSim .....	39
Figura 6.3: Pantalla Datos Físicos del vehículo Carsim. ....	40
Figura 6.4: esquema del engranaje planetario utilizado en la transmisión .....	43
Figura 6.5: Combinación Carsim-Simulink .....	45
Figura 6.6: Importación de datos de Simulink a Carsim .....	46
Figura 6.7: Exportación de datos de Carsim a Simulink.....	46
Figura 6.8: Simulación cambio de sentido CarSim.....	48
Figura 6.9: Diagrama de bloques programa Simulink.....	49

# CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

---

En los últimos años, las empresas del mundo automovilístico han invertido una parte importante de su tiempo y dinero en la correcta simulación del comportamiento de los vehículos en movimiento mediante programas de ordenador.

Actualmente, la simulación está a la orden del día. Permite realizar numerosas pruebas a través de un ordenador, evitando la experimentación real, la cual necesita una gran capacidad económica, la disposición real del vehículo de estudio, el espacio necesario y los sistemas de medición electrónicos. Sin olvidar la importante disminución de los riesgos al emplear un sistema simulado y la profundización del estudio sobre comportamiento del vehículo.

Un gran número de empresas automovilísticas, emplean el uso del programa *CarSim* para la simulación del comportamiento dinámico de vehículos. El realismo de este programa y el alto grado de eficacia justifican su uso en las empresas. Los modelos matemáticos *Carsim* incluyen casi 300 variables que se pueden emplear para incluir modelos alternativos desde la plataforma *Simulink* [1].

Para la medida de los resultados de los experimentos, uno de los equipos más empleados actualmente es el sistema medición de *VBOX*.

*VBOX* es un potente sistema basado en tecnología GPS para la medición y registro del comportamiento dinámico del vehículo en movimiento. El sistema de medición *VBOX* determina la velocidad y la posición del vehículo en cada instante de la prueba.

## 1.1. OBJETIVO

---

El objetivo de este proyecto consiste en configurar el modelo de un vehículo y realizar un estudio del comportamiento dinámico del mismo. Se simula la prueba realizada de manera experimental. Los resultados obtenidos de la simulación, se comparan con los resultados obtenidos en la prueba realizada al vehículo real. Se pretende obtener resultados cercanos a los valores medidos mediante *VBOX*, lo que permita en futuros proyectos, simular el comportamiento dinámico del vehículo a diferentes pruebas mediante el software informático obteniendo resultados cercanos a la realidad.

En el trabajo propuesto se combinan los programas *Carsim* y *Simulink* para el modelado y posterior control del vehículo simulado. *CarSim* aporta un modelo verificado que es utilizado por numerosos fabricantes de vehículos, además propone herramientas más avanzadas para visualizar y representar los resultados obtenidos en los ensayos. El programa *CarSim* tiene un amplio rango de uso, un alto grado de realismo y la posibilidad de combinar con otros programas, pudiendo obtener resultados idénticos a los obtenidos de manera experimental [\[2\]](#).

Para lograr el objetivo en primer lugar se deberá aprender a manejar el programa de simulación *CarSim* y en segundo lugar se deberá combinar ambos programas para demostrar la eficacia del modelo de vehículo configurado.

Para la posterior validación se comparan los valores obtenidos en la simulación y en las pruebas previamente realizadas del ángulo de deslizamiento, la velocidad de guiñada o Yaw Rate y la aceleración lateral en diferentes situaciones.

## 1.2. MOTIVACIÓN

---

En la actualidad existe un aumento de la preocupación sobre la seguridad vial. Un gran número de accidentes vienen precedidos por una pérdida del control del vehículo. El conocimiento del vehículo en numerosas condiciones, incluyendo condiciones límite, permite controlar un mayor número de variables para poder complementarlas con soluciones y mejoras reales.

En los proyectos de investigación, un parámetro principal es la inversión económica necesaria para su realización. Controlar el comportamiento del vehículo mediante un ordenador sin necesidad de la experimentación real, genera una importante disminución del gasto económico. Esto provoca la posibilidad de realizar un mayor número de estudios, ampliando el conocimiento del comportamiento del vehículo.

Con este análisis se busca obtener una simulación lo más cercana posible a la realidad, para poder predecir el comportamiento completo del vehículo en pruebas futuras.

## 1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

---

Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento dinámico de un vehículo mediante los softwares *CarSim* y *Simulink*.

El resto del proyecto consta de los ocho siguientes capítulos:

### *CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE.*

El segundo capítulo del proyecto se centra en la historia del estudio del comportamiento dinámico de los vehículos. Su evolución, desde el comienzo hasta los softwares de ordenador empleados.



### *CAPITULO III: MODELO Y SENSORIZACIÓN DEL VEHÍCULO*

En este capítulo se define el vehículo empleado para las pruebas y sus datos técnicos principales.

También se centra en el sistema de medición mediante GPS que permite medir los diferentes parámetros durante la prueba y la sensorización realizada al vehículo.

### *CAPITULO IV: PARÁMETROS DE ESTUDIO*

Se plantea mediante un diagrama de bloques las relaciones necesarias para realizar la simulación.

También se encuentra la definición de las variables de salida, explicando su función e importancia a la hora de la conducción.

### *CAPITULO V: MÉTODO EXPERIMENTAL*

En este apartado se define la prueba realizada. A continuación se representan de manera gráfica, los resultados obtenidos de los diferentes parámetros mediante el sistema de medición *VBOX*.

### *CAPITULO VI: SIMULACIÓN MEDIANTE CARSIM.*

En este sexto capítulo, en primer lugar, se define el programa *CarSim* y se explica cómo modelar el vehículo, el entorno y el control de la simulación. A continuación se explica cómo enlazar los programas *CarSim* y *Simulink*.

En segundo lugar se realiza una breve descripción del programa *Simulink* y de el diagrama de bloques obtenido para la realización del proyecto.

Por último se representan gráficamente las variables de salida de la simulación.

## CAPITULO VII: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

El séptimo capítulo se centra en comparar los resultados obtenidos en la simulación y los resultados de las pruebas realizadas. La simulación se divide en tres partes diferentes para un análisis más detallado de los resultados.

Para cuantificar los resultados, se calcula el porcentaje de error obtenido en cada caso.

## CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS.

Para concluir el proyecto, se dedica este capítulo para hablar de la eficacia obtenida en la simulación, así como, de los futuros trabajos que se pueden realizar para la continuación del estudio realizado, mejorando la comprensión sobre el comportamiento dinámico de un vehículo.

## CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE

---

Una máquina a destacar por la notable importancia que ha adquirido en el siglo XX ha sido el automóvil, el cual ha significado un notable progreso para la humanidad, llegando a ser considerado una herramienta de vida de los seres humanos. Por lo tanto, son comprensibles, los constantes estudios para su perfeccionamiento, buscando minimizar los riesgos de su uso y mejorar la eficiencia de su utilización. El tema de dinámica vehicular ha sido abordado por numerosos autores, basándose este en los fundamentos básicos de la mecánica [3].

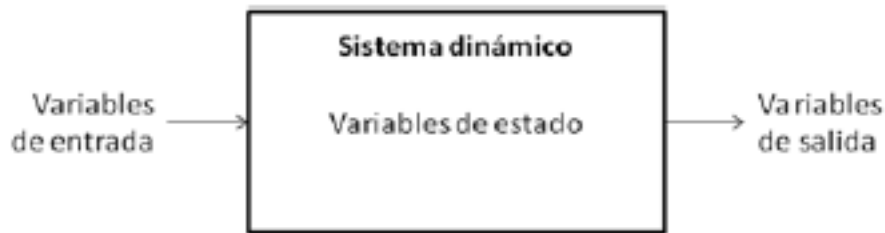
La simulación de la dinámica vehicular comenzó hace más de 60 años. Inicialmente se empleaban modelos muy simplificados del vehículo, se empleaban estudios a velocidades o radios de giro constantes. Más adelante se desarrollaron modelos especializados en movimientos que empleaban sistemas de ecuaciones de diferente complejidad [4].

Broenink en 1999 realizó un estudio de la dinámica vehicular mediante la mecánica clásica, con el modelo de rueda en su análisis de giro desde el punto de vista de las velocidades angulares. Si se amplía el rango, podemos encontrar investigadores que se centran en el modelamiento cinemático de un móvil como Bidwell en 1970, haciendo referencia de manera global al tema de la dinámica. En el modelado de un automóvil cabe destacar las investigaciones realizadas por Sano en 1986 para vehículos de 4 ruedas. La dinámica de un vehículo contempla el exhaustivo análisis de su comportamiento en movimiento lineal y en curva, constituyéndose este último tema en el centro de la mayoría de las publicaciones sobre la materia [3].

Actualmente se emplean programas complejos de simulación que poseen tal grado de complejidad que permiten realizar un estudio extendido de cada una de las partes del vehículo [5]. Dentro de los softwares específicos para la dinámica vehicular se encuentran *CarSim* o *SCANeR*.

## 2.1. SISTEMAS DINÁMICOS

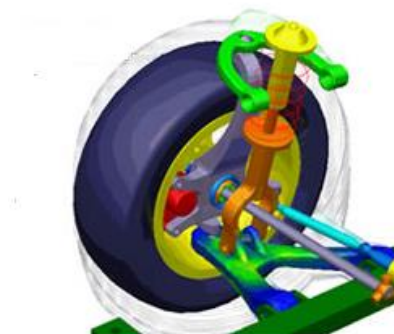
Se define Sistema Dinámico como un modelo que describe el recorrido en función del tiempo de todos los puntos de un espacio determinado [6]. Un sistema dinámico se puede representar mediante un sencillo diagrama de bloques, ver figura 2.1.



*Figura 2.1: Diagrama de bloques de un Sistema dinámico*

Las variables de entrada, representan la acción del entorno sobre el sistema, influenciando por tanto a las variables de estado. Las variables de salida son la representación de la respuesta del sistema.

Dentro de los sistemas dinámicos se encuentran los conocidos sistemas multicuerpo [7]. Los cuales se definen como un conjunto de sólidos rígidos o deformables, cuyo movimiento está limitado o restringido mediante uniones o pares cinemáticos situados entre ellos, ver Figura 2.2.



*Figura 2.2: Sistema multicuerpo de la transmisión de un vehículo*

Debido al alto grado de complejidad en el modelado y análisis de dichos sistemas, se han empleado los grandes avances en el campo computacional para su estudio, lo que ha generado el campo de la ingeniería asistida por ordenador (CAE). Este campo se materializa mediante los softwares de simulación dinámica de sistemas multicuerpo [7].

Los vehículos terrestres son un caso particular de los definidos sistemas multicuerpo. Dada la gran importancia de los vehículos, la dinámica de los sistemas multicuerpo aplicadas a este sector adquiere el nombre de *dinámica vehicular*. El campo de la dinámica vehicular es sumamente complejo debido a la gran cantidad de variables que pueden influir en el sistema, la manera de acoplarse unas a otras y la impredecible actuación del ser humano. Las interacciones con el asfalto, las cargas aerodinámicas y los diferentes dispositivos de maniobra y control, son los principales factores empleados para la simulación. Todo esto genera numerosos cambios en el comportamiento dinámico del vehículo [4]. Por ello para simplificar el estudio, la dinámica vehicular se divide en tres áreas diferentes, la dinámica longitudinal, la dinámica lateral y la dinámica vertical [13], ver figura 2.3.

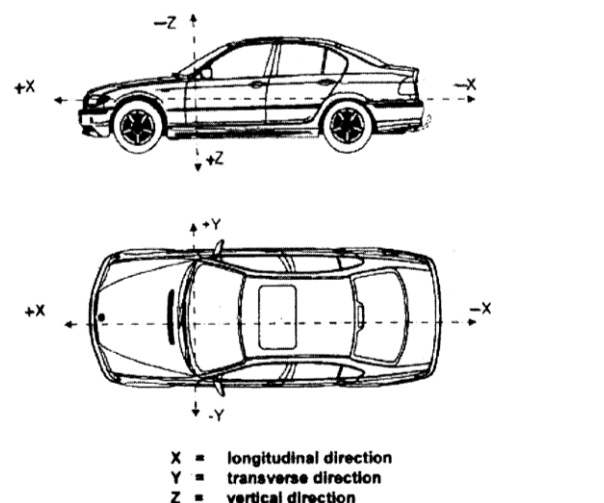


Figura 2.3: Áreas de la dinámica vehicular

La división en tres ejes permite un estudio más centrado del comportamiento del vehículo y un análisis más específico de la influencia de los diferentes parámetros que modelan el comportamiento del mismo. Todo ello hace que también sean objeto del estudio mediante ingeniería asistida por ordenador, ver figura 2.4, más concretamente cuenta con softwares específicos para su simulación, como *CarSim* o *SCANer*.



*Figura 2.4: Vehículo simulado en CarSim*

Uno de los principales usos de estos softwares es para el estudio y mejora de los sistemas de seguridad activa de los vehículos, como el sistema de frenado antibloqueo (ABS) o el sistema electrónico de seguridad (ESP).

## 2.2. MODELO MATEMÁTICO

---

Se entiende como modelo matemático [11] a una descripción desde el punto de vista matemático de un hecho o fenómeno el cuál se puede encontrar en el mundo real. Se define desde el tamaño de una población, hasta fenómenos físicos como la velocidad, o aceleración. El fin de un modelo matemático es poder comprender de una manera amplia el fenómeno de estudio e incluso poder predecir su comportamiento en el futuro. En algunos casos las relaciones matemáticas entre los diferentes elementos son sencillas y pueden resolverse de manera analítica. Pero en la mayoría de los casos debido a su complejidad, los modelos deben estudiarse mediante programas de ordenador.

En concreto en el programa *CarSim* los modelos matemáticos son de tipo paramétrico. El equipo de desarrollo de software de simulación mecánica utiliza el programa multicuerpo *VehicleSim*. Los modelos matemáticos empleados por *CarSim* cubren el sistema completo del vehículo y sus entradas. Los modelos son ampliables mediante comandos integrados en *VehicleSim*, *Matlab*, *simulink*, *labVIEW*, y programas personalizados escritos como en *Visual Basic* y en *C++*.

## CAPITULO III: MODELO Y SENSORIZACIÓN DEL VEHÍCULO

---

El tercer capítulo del proyecto se centra en el modelo de vehículo empleado y el sistema de medición usado para la obtención de los parámetros en la experimentación.

### 3.1. DEFINICIÓN DEL VEHÍCULO DE ESTUDIO

---

El vehículo de estudio es un TOYOTA PRIUS. El vehículo ha sido cedido por la marca automovilística Toyota para la realización de las pruebas. El modelo en concreto es un TOYOTA PRIUS 1.8HSD ECO fabricado en el año 2013, ver imagen 3.1.



*Imagen 3.1: Vehículo Toyota Prius 1.8 HSD ECO*



El vehículo Toyota Prius 1.8 HSD Eco pertenece a la tercera generación de Toyota Prius que se han fabricado. Toyota Prius es un automóvil híbrido-gasolina del segmento C. Este se ha convertido en uno de los mayores representantes de los vehículos híbridos hasta el momento.

La tercera y última generación, trajo otro rediseño tanto interno como externo respecto a la segunda generación. Estos instalan un motor 1.8 litros de ciclo Atkinson con 98 CV de potencia, que con el motor eléctrico dan un total de 134 CV. Además cuenta con un mayor par motor, mejorando considerablemente los consumos tanto urbanos como por carretera [8], ver tabla 3.1.

Velocidad máxima del vehículo	180 km/h
Aceleración 0-100 km/h	10.4s
Consumo urbano	3.9 l/100km
Consumo extraurbano	3.7 l/100km
Consumo medio	3.9 l/100km
Emisiones de Co2	90 gr/km
Normativa de emisiones	Euro V
Tipo de Carrocería	Turismo
Nº de puertas	5

*Tabla 3.1: Datos genéricos del vehículo*

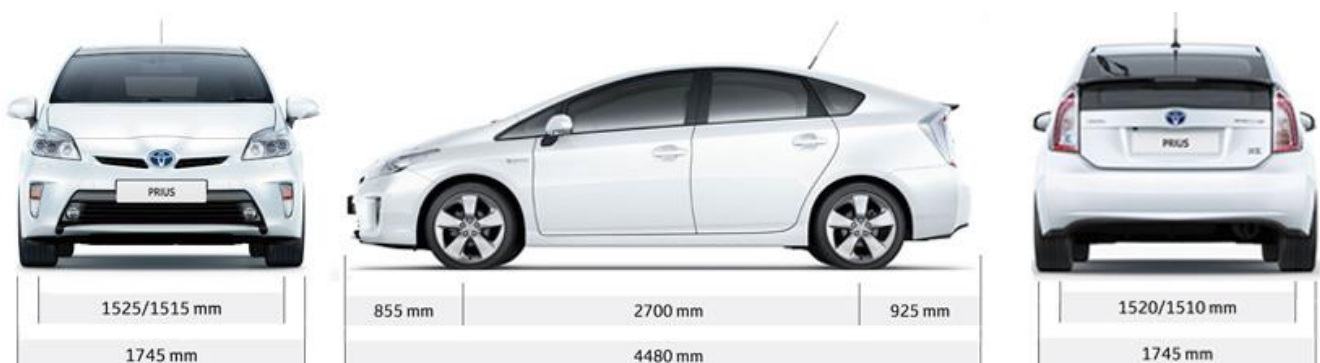
## 3.2. DATOS TÉCNICOS

El Toyota Prius es un vehículo híbrido en el que trabajan de manera conjunta un motor eléctrico y un motor gasolina.

El motor eléctrico se emplea como ayuda al motor gasolina para poder trabajar en las mejores condiciones posibles y disminuir en gran medida el consumo del vehículo. El motor eléctrico es básicamente de ayuda, pudiendo llegar a mover de manera independiente el automóvil, el cual se estaría desplazando sin consumir combustible y reduciendo de manera significativa el ruido producido. Este se alimenta de una serie de baterías que se recargan mientras el automóvil esta en movimiento sin necesidad de una fuente externa, dicha capacidad es destacable debido a que los vehículos completamente eléctricos necesitan poder cargar las baterías mediante conexionado externo.

El Toyota Prius supera los problemas de poca autonomía, largo tiempo de recarga y escasas prestaciones de los vehículos eléctricos, convirtiéndose en el automóvil con motor de combustión interna de mayor rendimiento y menores emisiones.

Las dimensiones principales del vehículo se muestran en la figura 3.1.



*Figura 3.1: Dimensiones Toyota Prius 1.8 HSD ECO*

Los datos técnicos obtenidos se han conseguido gracias a la propia ficha técnica del vehículo, así como de su manual de usuario. Las características principales se muestran en la tabla 3.2

Largo/Ancho/alto (mm)	4480/1745/1490
Batalla (mm)	2700
Vía delantera/trasera (mm)	1525/1520
Área frontal ( $m^2$ )	1.746
Peso (kg)	1445
Potencia máxima (CV-kw)	136/100
Peso en eje delantero	63%
Peso en eje trasero	37%
Coeficiente Cx	0.25
Posición del centro de gravedad	
L1 (longitud respecto al eje delantero) (mm)	999
L2 (longitud respecto al eje trasero) (mm)	1701
Altura (mm)	540

*Tabla 3.2: Características principales*

El vehículo Toyota Prius trabaja con un motor de combustión y un motor eléctrico. Las características del motor de combustión se muestran en la tabla 3.3. Las características del motor eléctrico se muestran en la tabla 3.4.

Motor de combustión	1.8L 4 cilindros
Combustible	Gasolina
Potencia máxima (CV-Kw/rpm)	99-73/5200
Par máximo	142/4000
Situación	Delantero transversal
Nºcilindros	4 en línea
Material del bloque/culata	Hierro/Aluminio
Diámetro x carrera (mm)	80.5 x 88.3
Cilindrada ( $m^3$ )	1798
Relación de compresión	13.0 a 1
Distribución	4 válvulas por cilindro. Dos árboles de levas en la culata.
Alimentación	Inyección directa
Inertia engine ( $\frac{kg}{m^2}$ )	0.18

*Tabla 3.3: Características motor de combustión*

Tipo de corriente	Corriente alterna
Potencia máxima (Cv-Kw)	82-60
Par máximo (Nm)	207
Ubicación	Delantero transversal
Tensión nominal (V)	202
BATERIA	
Tipo	Acumulador de níquel-hidruro metálico
Ubicación	Trasera
Capacidad (Kw·h)	1.3

*Tabla 3.4: Características motor eléctrico*

Los datos del sistema de transmisión se muestran en la tabla 3.5.

Tracción	Delantera
Caja de cambios	Automática, múltiples velocidades.
Tipo de mando	Selección
Tipo de embrague	Sin embrague

*Tabla 3.5: Características sistema de transmisión*

Los datos de la dirección del vehículo se muestran en la tabla 3.6.

Tipo	Cremallera
Tipo de asistencia	Eléctrica
Asistencia en función de la velocidad	Si
Desmultiplicación en función de la velocidad	No
Desmultiplicación no lineal	No
Desmultiplicación dirección	14.6
Dirección en las cuatro ruedas	No
Diámetro de giro entre bordillos/paredes (m)	11/11.8
Holgura giro volante (mm)	30
Vueltas del volante entre topes	2.8

*Tabla 3.6: Características dirección del vehículo*

Las características del sistema de suspensión se muestran en la tabla 3.7.

Suspensión delantera (estructura/muelle)	Tipo McPherson/Resorte helicoidal
Suspensión trasera (estructura/muelle)	Rueda tirada con elemento torsional/Resorte helicoidal
Barra estabilizadora delante	Si
Barra estabilizadora detrás	Si

*Tabla 3.7: Características sistema de suspensión*

Para finalizar se definen las características del sistema de frenado, ver tabla 3.8, y de los neumáticos del vehículo, véase tabla 3.9.

Frenos delanteros	Disco ventilado
Frenos traseros	Disco
Diámetro frenos delanteros/traseros (mm)	255/259
Límite de desgaste de las pastillas de freno (mm)	1
Pedal libre de uso (mm)	1-6
Fluido	SAE J1703 o FMVSS No 116 DOT 3

*Tabla 3.8: Características sistema de frenado*

Neumáticos delanteros	195/65 R15 89S
Neumáticos traseros	195/65 R15 89S
Llantas delanteras	15 pulgadas
Llantas traseras	15 pulgadas
Presión de inflado	2.4 bar (delante), 2.3 bar (detrás)

*Tabla 3.9: Características neumáticos vehículo*

## 3.2. SISTEMA DE MEDICIÓN VBOX

El sistema VBOX es un potente sistema basado en tecnología GPS para la medición y registro del comportamiento dinámico del vehículo en movimiento.

Los registradores de datos y sensores de velocidad VBOX están basados en GPS de alta precisión y tecnología de medida inercial. A partir de dichos sensores de velocidad, permiten obtener un valor preciso de la velocidad del vehículo en cada instante de la prueba.

Los registradores de datos GPS son ideales para las pruebas en el mundo del motor, debido a su peso ligero, pequeño tamaño y precisión. El sistema de medición VBOX es muy empleado para la mejora de los vehículos de competición. En el mundo del motor donde se requiere una preparación del vehículo a la máxima capacidad que puede dar, es muy común el uso de estos sensores GPS.

Los pilotos profesionales lo emplean para sintonizar la conducción, para calcular los tiempos por vuelta, comparar vehículos y sintonizar los datos para las carreras.

Escuelas de conducción y numerosas compañías como BMW y Silverstone utilizan VBOX con pantallas para grabar videos y proporcionar una ayuda de formación.

Además VBOX permite grabar videos a través de numerosas cámaras que permite instalar.

Dentro del programa experimental se realizan maniobras de conducción combinadas en las que se registran lecturas de los diversos sensores.

Para la obtención de las variables de estudio se emplea el producto VBOX 3i Dual Antenna y VBOX Yaw Rate Sensor.

### 3.2.1. VBOX 3i DUAL ANTENNA

---

El equipo VBOX 3i Dual Antenna, véase imagen 3.2, es un receptor de GPS con un alto nivel de precisión. Permite obtener numerosos parámetros pudiendo conseguir 100 muestras por segundo [9] .



*Imagen 3.2: Sistema VBOX 3i Dual Antenna*

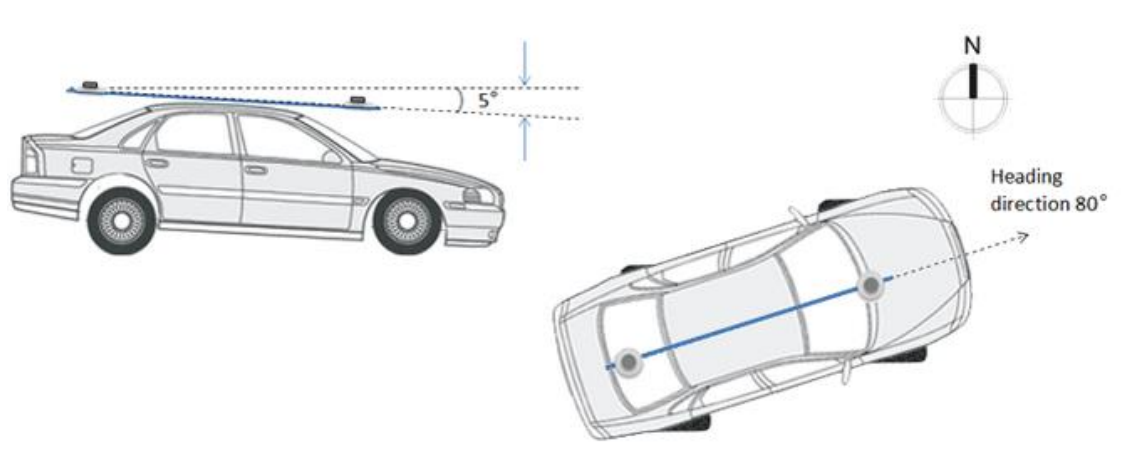
Emplea dos antenas gemelas, véase imagen 3.3, que permiten obtener el ángulo de deslizamiento y el ángulo de cabeceo o balanceo en función de la orientación de las mismas.





*Imagen 3.3: Antenas gemelas VBOX*

Si se instala de manera longitudinal a lo largo del vehículo permiten obtener el ángulo de deslizamiento del vehículo, véase figura 3.2. En cambio sí se instalan de manera transversal a la longitud del vehículo se obtiene el ángulo de balanceo.



*Figura 3.2: Antenas instaladas para ángulo de deslizamiento sistema VBOX*

Este equipo permite la medición simultánea de varios factores como la velocidad, la posición y el ángulo de deslizamiento. Tiene una gran facilidad de instalar y de transportar, así como la disposición de una pantalla en la que se muestran los resultados en tiempo real.

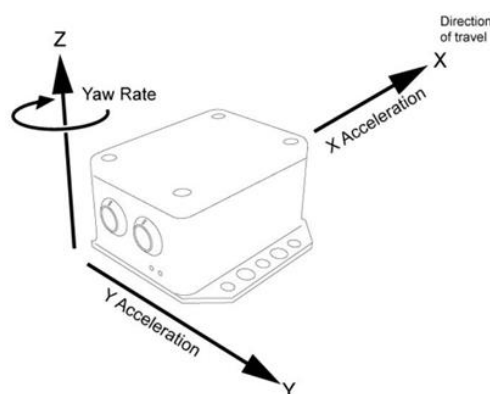
Se emplea en pruebas de frenos, pruebas de rendimiento de aceleración y de velocidad. Todos los parámetros se pueden observar en una gráfica personalizable donde estos pueden ser escaneados, analizados y manipulados para usos futuros.

## 3.2.2. VBOX YAW RATE SENSOR

El sensor Yaw Rate de *VBOX*, véase imagen 3.4, es un sensor de velocidad de guiñada con acelerómetros integrados. Los acelerómetros se montan en el eje X e Y para medir la aceleración lateral y longitudinal del vehículo, véase figura 3.3. En el interior también dispone de un sensor de temperatura. Este se puede conectar directamente a otro equipo *VBOX* o como un dispositivo independiente, con la salida CAN totalmente configurable por el usuario final.



*Imagen 3.4: Sistema V-BOX Yaw Rate Sensor*



*Figura 3.3: Parámetros medición VBOX YAW RATE SENSOR*

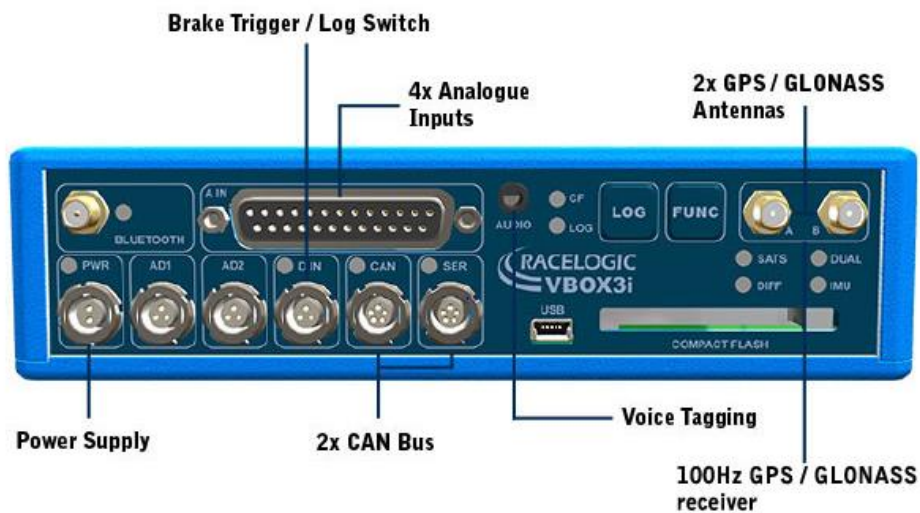
## 3.3. SENSORIZACIÓN DEL VEHÍCULO

Para la medición de los parámetros de estudio se instalan los equipos VBOX YAW RATE SENSOR y VBOX 3i DUAL ANTENNA en el vehículo Toyota Prius, véase imagen 3.5.



*Imagen 3.5: Vehículo sensorizado*

La instalación del equipo VBOX 3i DUAL ANTENNA se ha de realizar según las especificaciones del mismo, véase imagen 3.6.



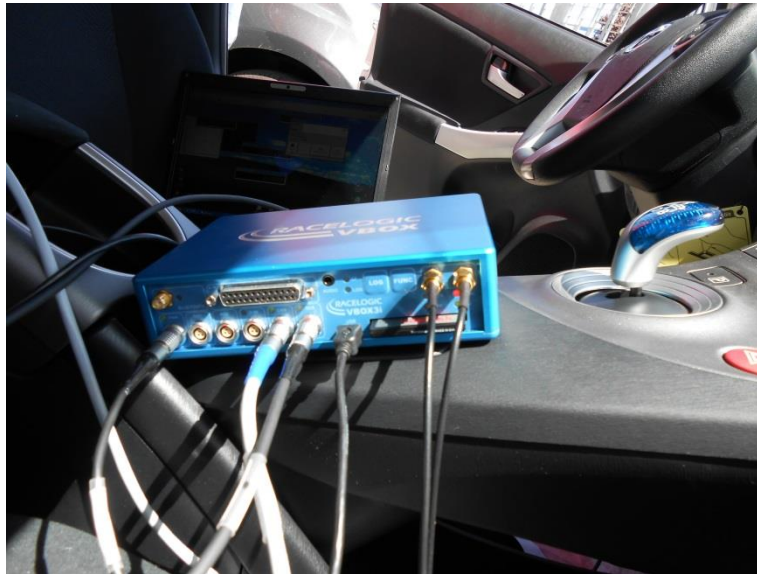
*Imagen 3.6: Entradas VBOX 3i DUAL ANTENNA*

Según las referencias indicadas en la imagen 3.6, las tomas instaladas en el vehículo son:

- Tomas 2xGPS/GLONASS Antennas: se conectan con las antenas instaladas en la parte superior del vehículo. La antena principal proporciona los valores de tiempo, velocidad y posición a través del efecto doppler en la señal portadora de GPS, mientras que la antena secundaria facilita los parámetros de ángulo de deslizamiento y de ángulo de balanceo/cabeceo (dependiendo de la orientación de la antena).
- Tomas 2x CAN bus: la primera conexión de can bus permite introducir datos desde módulos externos de Racelogic. Esta toma se conecta al equipo VBOX YAW RATE SENSOR para introducir los parámetros aportados por el mismo. La segunda interfaz de Can Bus permite registrar señales de una fuente Can diferente. Para este proyecto se instala en la toma OBD del vehículo.

Para la extracción de datos del equipo a un PC, se realiza a través de la toma USB que tiene el equipo. También se inserta una tarjeta de datos con espacio limitado para el almacenamiento de datos.

Según las indicaciones señaladas, se conecta el equipo al vehículo de estudio, véase imagen 3.7.



*Imagen 3.7: Equipo VBOX 3i DUAL ANTENNA conectado al vehículo de estudio*

El equipo VBOX YAW RATE SENSOR dispone de dos tomas, la primera interfaz permite la conexión con otro equipo VBOX. La segunda toma permite usarlo como dispositivo independiente, donde el usuario puede configurar la salida de datos. Se conecta mediante la primera toma al equipo *VBOX 3i DUAL ANTENNA*, véase imagen 3.8.



*Imagen 3.8: Conexionado VBOX 3i DUAL ANTENNA Y VBOX YAW RATE SENSOR*

La instalación de las antenas, ver imagen 3.9, se realiza en el techo del vehículo en dirección longitudinal para la medición del ángulo de deslizamiento. Estas disponen de unas ventosas que fijan la antena al techo, véase imagen 3.10.



*Imagen 3.9: antena VBOX*



*Imagen 3.10: ventosas amarre antena*

Se instala una antena en cada extremo de la barra fijadora, las cuales se conectan al equipo *VBOX 3i DUAL ANTENNA*. La primera proporciona los parámetros de la velocidad y la posición mediante conexión GPS empleando el efecto doppler. La antena secundaria, proporciona los parámetros del ángulo de deslizamiento del vehículo.

## CAPITULO IV: PARÁMETROS DE ESTUDIO

En el actual capítulo se definen las variables que se han de tener en cuenta a la hora del estudio del comportamiento dinámico del vehículo. Para una mayor comprensión del proyecto realizado, ver figura 4.1

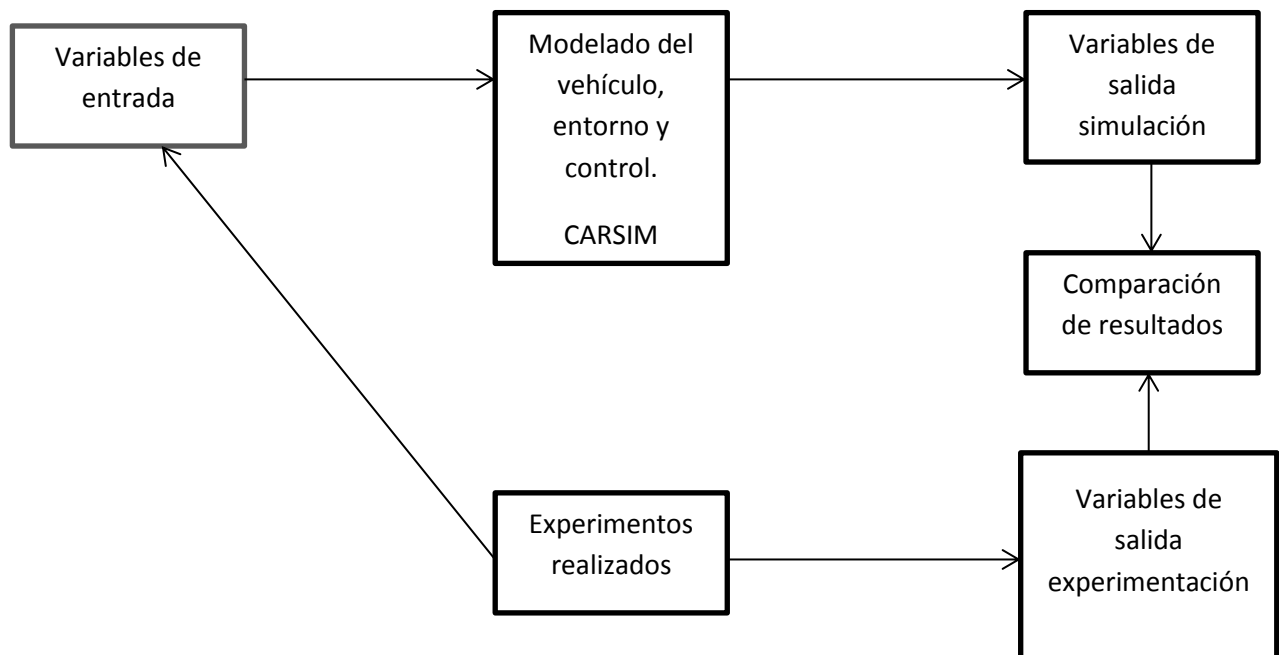


Figura 4.1: Diagrama de bloques del Sistema

Las relaciones representadas en el diagrama anterior se programan mediante la extensión de *Matlab, Simulink*.

La principal dificultad para definir el sistema de estudio es la capacidad de abstracción y simplificación de las variables más significativas separándolas de las de menor importancia. Hay que simplificar las variables pero sin descuidar y dejar variables determinantes fuera del modelo.

La tarea del modelado del vehículo y su entorno implica la búsqueda de un punto de equilibrio. Es decir, el modelo debe representar los aspectos del sistema real con el grado de detalle necesitado, siendo este lo más sencillo posible.



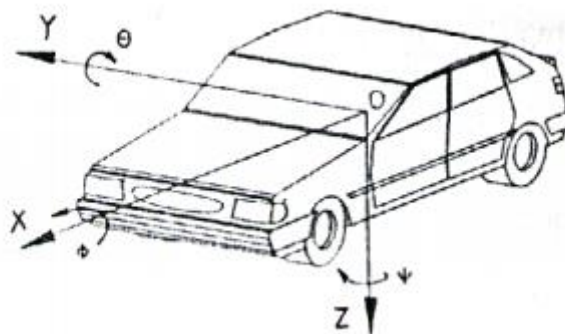
No debe hacerse un modelado demasiado detallado con variables que contribuyan poco o nada a la comprensión del problema.

Para la simulación se ha de controlar numerosas variables técnicas del vehículo, siendo algunas de ellas de especial dificultad, debido a la clara opacidad de las marcas automovilísticas a desvelar datos de sus vehículos.

## 4.1. COMPORTAMIENTO DIRECCIONAL DE UN VEHÍCULO

Para poder entender el comportamiento direccional de un vehículo, lo primero que se ha de entender es que su respuesta en carretera viene influenciada por numerosas condiciones que van desde las acciones ejercidas por el conductor sobre el volante, la fuerza centrífuga y las condiciones en la calzada.

El automóvil una vez se encuentra en movimiento, sufre problemas en la estabilidad de la dirección del movimiento debido a perturbaciones externas. El primer paso para comprender el análisis del vehículo viene dado por determinar un sistema de referencia que nos permita identificar y asociar los diferentes componentes, véase figura 4.2.



*Figura 4.2: Sistema de referencia en vehículo*

El movimiento en el eje X viene definido como el desplazamiento longitudinal del vehículo, este desplazamiento es el realizado por el vehículo en la dirección del movimiento. El movimiento a lo largo del eje Y se conoce como desplazamiento lateral del vehículo y por último el desplazamiento a lo largo del eje Z se conoce como desplazamiento vertical [10].

Los ángulos a lo largo de los ejes quedan definidos como:

- La variación angular  $\phi$  se denomina ángulo de balanceo.
- El ángulo  $\Theta$  es conocido como el ángulo de cabeceo del vehículo.
- El ángulo  $\psi$  se conoce como ángulo de guiñada.

## 4.2. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS

Durante los experimentos realizados en el vehículo, se realizan numerosas maniobras, las cuales permiten abarcar el comportamiento habitual del vehículo durante su uso cotidiano. Se miden los cinco parámetros más importantes para el estudio del comportamiento dinámico de un vehículo, véase tabla 4.1.

VARIABLE	UNIDADES
Steering del vehículo	Deg.
Velocidad longitudina del vehículo	Km/h
Ángulo de deslizamiento ( $\beta$ )	Deg.
Yaw Rate	Deg/s.

*Tabla 4.1: Parámetros obtenidos mediante VBOX*

Los parámetros del steering y velocidad longitudinal del vehículo se emplean como variables de entrada para el control de la trayectoria de la simulación, consiguiendo que la prueba simulada realice los mismos movimientos que en el experimento real.

Los valores del ángulo de deslizamiento, de la aceleración lateral y de la velocidad de guiñada se emplean para la comparación de los resultados finales de la simulación.

## 4.2.1. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE SALIDA

Las variables de salida del modelo de estudio son:

- Velocidad de guiñada o Yaw Rate.
- Ángulo de deslizamiento.
- Aceleración lateral

Las variables han sido seleccionadas debido a la importancia que tienen en la seguridad del usuario a la hora de conducir el vehículo.

### 4.2.1.1. VELOCIDAD DE GUIÑADA

La velocidad de guiñada se considera a la variación en función del tiempo del ángulo Yaw del vehículo, véase figura 4.3. Es decir, la velocidad de guiñada es la velocidad angular del vehículo respecto al eje vertical.

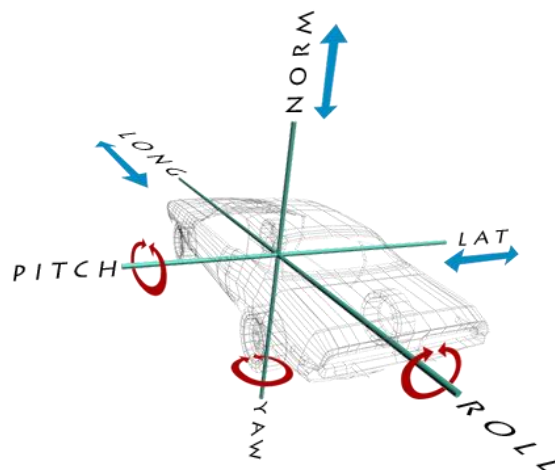


Figura 4.3: Sistema de ejes en un vehículo

La velocidad de guiñada es una variable vital que necesita ser conocida a la hora del control de la estabilidad del vehículo. Para evitar accidentes en ciertas condiciones, como lluvia intensa o nieve, se instalan en los vehículos un control electrónico de estabilidad para poder facilitar la conducción al usuario.

El papel del sensor YAW RATE [15] o sensor de velocidad rotacional en los sistemas de control de estabilidad tiene un rol clave. Este mide la velocidad angular de un vehículo sobre su eje vertical en grados o radianes por segundo, con el fin de determinar la orientación del vehículo a medida que sufre un giro brusco o se presenta una amenaza de vuelco.

Esta información se introduce en la computadora del vehículo para evaluar la velocidad de la rueda, el ángulo de la dirección y la posición del acelerador.

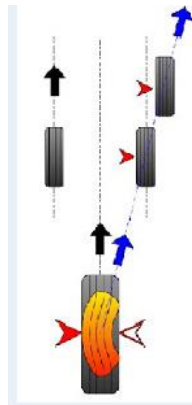
Si el sistema trabaja con demasiada velocidad rotacional el ABS aplica a fuera de frenado apropiada.

La computadora compara el YAW RATE real (giro real) con el YAW RATE objetivo, pudiendo identificar condiciones extremas y permitiendo realizar acciones correctivas por los demás sistemas.

## 4.2.1.2. ANGULO DE DESLIZAMIENTO

---

La fuerza ejercida por el vehículo sobre la calzada es transmitida a través de las ruedas. Las fuerzas laterales que actúan sobre el vehículo, y más concretamente sobre las ruedas, hacen que el vehículo siga una trayectoria diferente a la señalada por el neumático. Parte de esta distorsión es absorbida por el neumático, el cual sufre una deformación interna. El ángulo formado por la dirección de las ruedas y el deslizamiento del vehículo, es el conocido como ángulo de deslizamiento [16] .



*Figura 4.5: Causa ángulo de deslizamiento*

El ángulo de deslizamiento surge de la deformación que se produce en la banda de rodadura del neumático por la fricción entre la carretera y la superficie de contacto del mismo [17] .

Las relaciones entre los ángulos de deslizamiento en el eje delantero y trasero determinarán el comportamiento del vehículo en curva, es decir si el vehículo es sobrevirador o subvirador.



*Figura 4.6: Comportamiento del vehículo en curva*

El vehículo Toyota Prius se considera un vehículo subvirador. El comportamiento subvirador es el más buscado por la mayoría de los vehículos dirigidos a la mayoría del público, debido a su facilidad para controlar por un conductor inexperto.

### 4.2.1.3. ACELERACIÓN LATERAL

---

Durante un giro en un vehículo se genera un vector de aceleración que empuja el vehículo hacia el exterior de la curva, este vector se conoce como aceleración lateral. La unidad común para la aceleración lateral es la “fuerza g”.

El máximo valor de aceleración lateral que se puede obtener sin la pérdida de control del vehículo es importante para la mejora de la seguridad.

Cuando el vehículo alcanza cierto valor de aceleración lateral comienza a realizar trayectorias inestables, ya sea un comportamiento subvirador o sobrevirador, dependiendo del vehículo.

En la ingeniería de carreteras es muy útil el conocimiento de las aceleraciones laterales de los vehículos en una curva y la determinación de los factores que influyen de manera significativa en el aumento de la misma. En primer lugar la aceleración lateral se puede convertir en el coeficiente de fuerza lateral de una carretera, factor clave para la estabilidad de los vehículos que pasan por la misma.

En segundo lugar la aceleración lateral está directamente relacionada con la estabilidad del vehículo, por lo tanto se ha de tener en cuenta a la hora del diseño de la trayectoria y velocidad de las carreteras.

## CAPÍTULO V: MÉTODO EXPERIMENTAL

---

El vehículo Toyota Prius cedido por el grupo Toyota ha sido sometido a una serie de pruebas para medir su respuesta a situaciones a las que se encuentra sometido durante su uso cotidiano por ciudad. Se realizan numerosas acciones durante la conducción para realizar un estudio más detallado del comportamiento dinámico del vehículo. Se realizan giros ambos sentidos, cambios de sentido en rotonda, giros en rotonda, frenazos bruscos y aceleraciones pronunciadas.

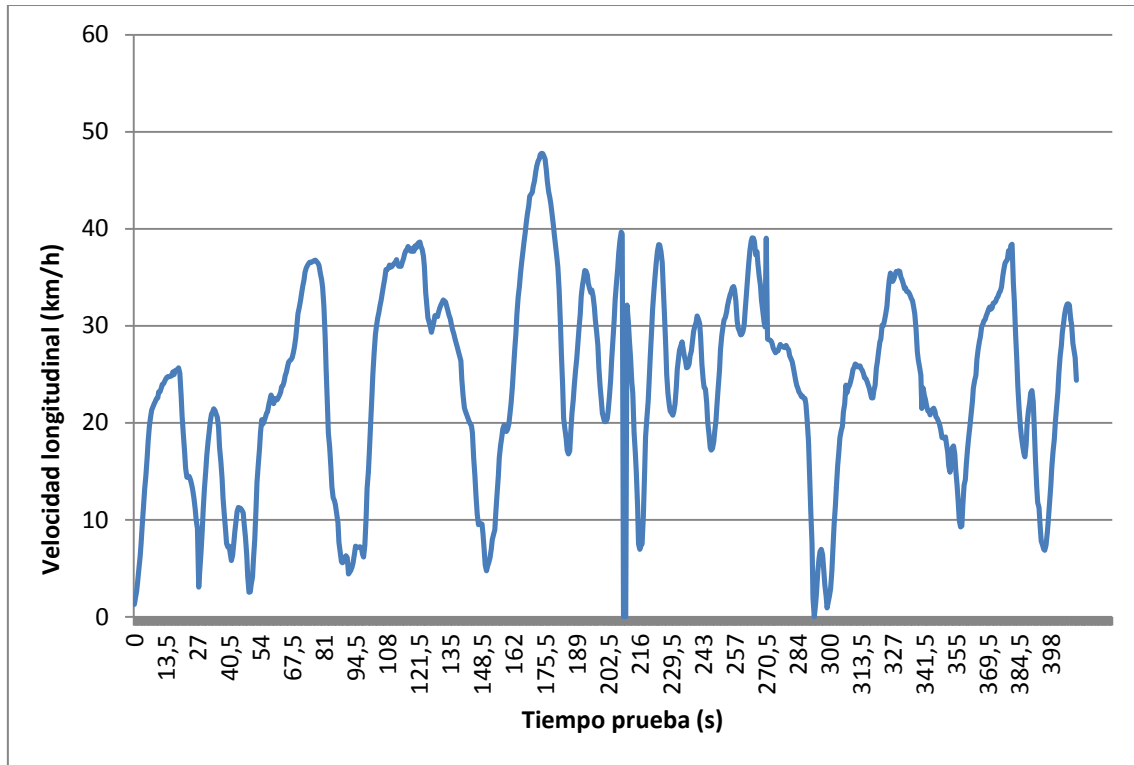
El sistema *VBOX* ha permitido medir los parámetros del vehículo durante la realización de la prueba.

### 5.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS VARIABLES OBTENIDAS

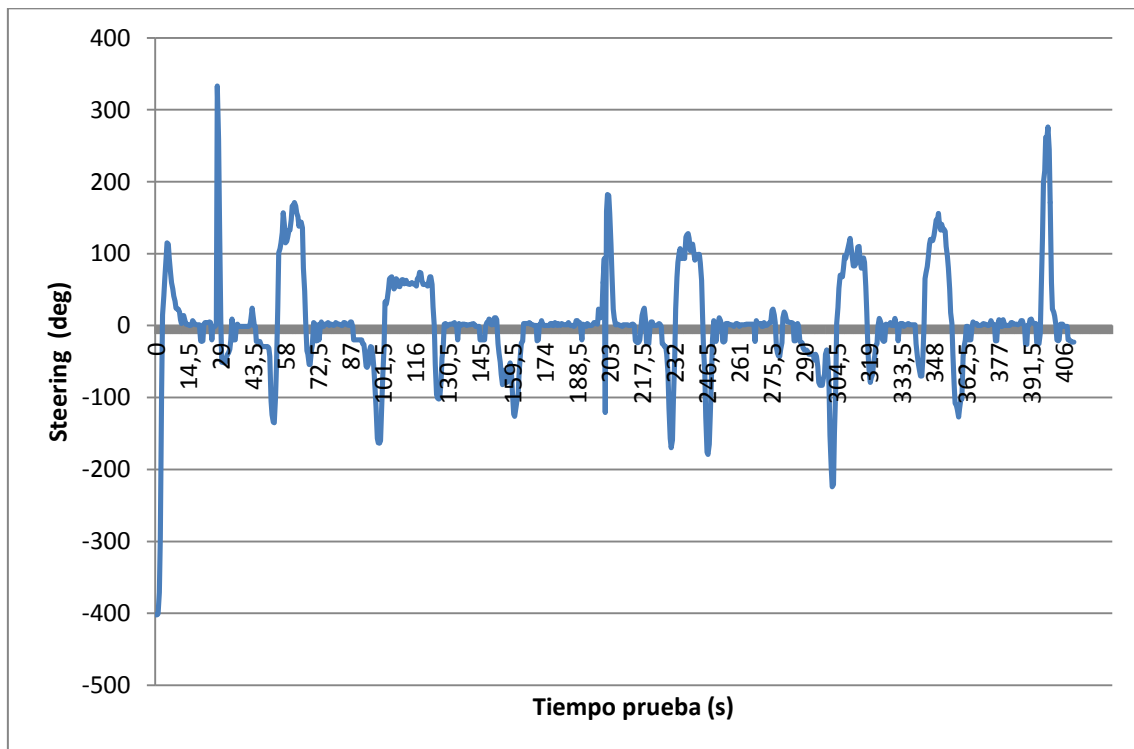
---

En este apartado se muestran los resultados obtenidos mediante el equipo de medición *VBOX*. Primero se muestran los parámetros de control como son la velocidad longitudinal, véase gráfica 5.1 y el ángulo steering del vehículo, véase gráfica 5.2. Para finalizar el apartado se representan los parámetros empleados para la comparación con los resultados de la simulación: el ángulo de deslizamiento, ver gráfica 5.3, la velocidad de guiñada, ver gráfica 5.4 y la aceleración lateral, véase gráfica 5.5.

El tiempo de simulación de la prueba es de 410 segundos, se han obtenido valores cada 0.5 segundos de cada una de las variables estudiadas.

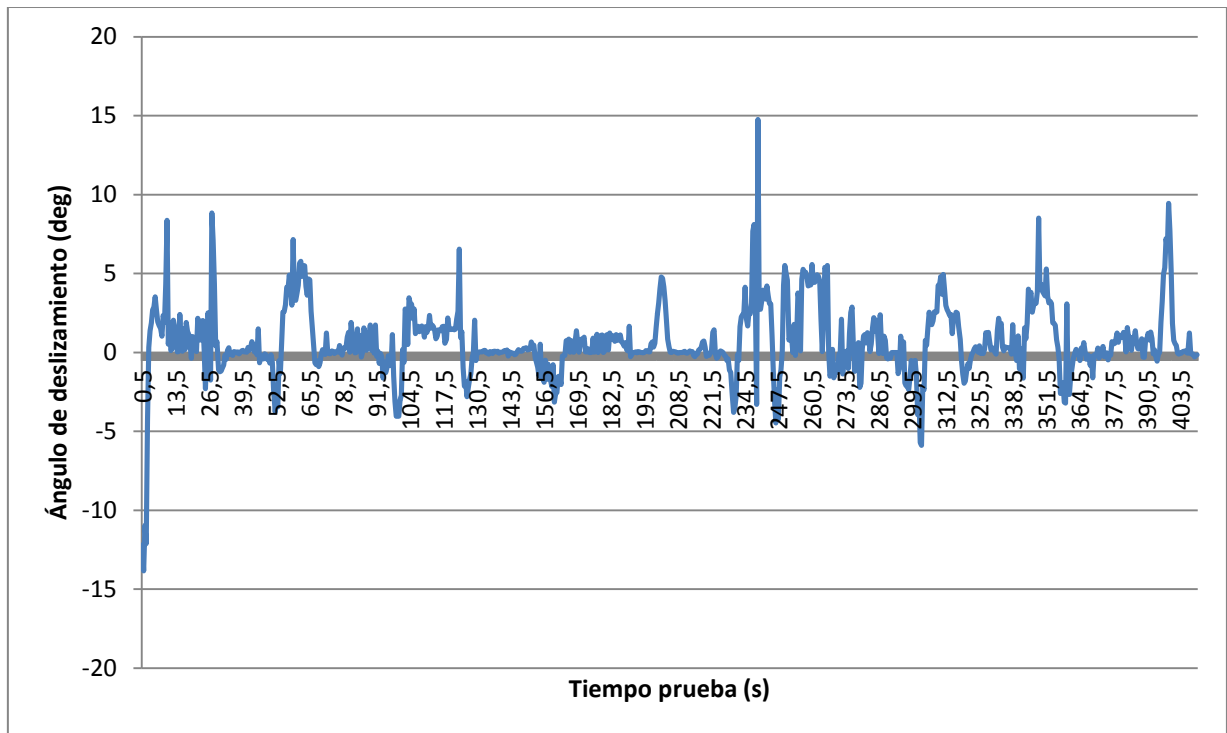


Gráfica 5.1: Velocidad longitudinal prueba (km/h)

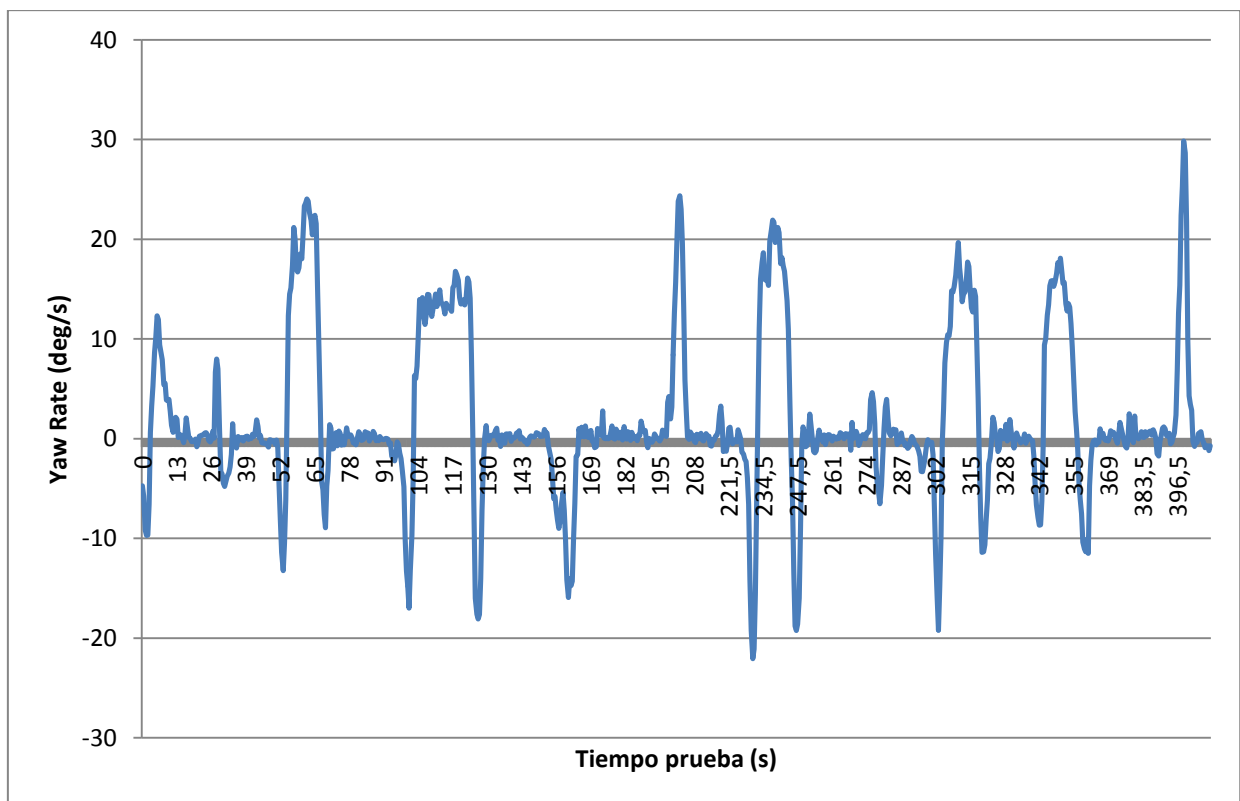


Gráfica 5.2: Steering vehículo prueba (deg)

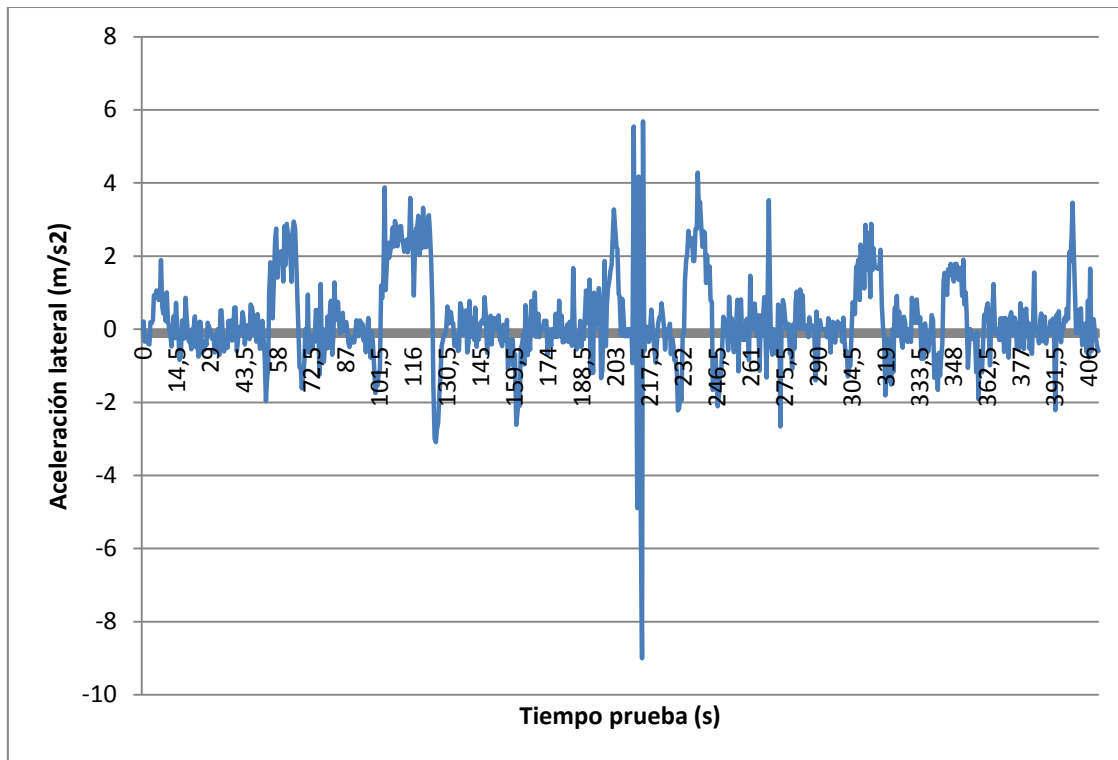




Gráfica 5.3: Ángulo de deslizamiento prueba (deg)



Gráfica 5.4: Yaw Rate prueba (deg/s)



Gráfica 5.5: Aceleración lateral prueba ( $m/s^2$ )

## CAPITULO VI: SIMULACIÓN MEDIANTE CARSIM

---

Para el modelado del vehículo, el entorno y el control se emplea el programa de simulación *CarSim*.

En la actualidad un gran número de empresas que se dedican al mundo del automóvil emplean el programa de simulación *CarSim* para estudiar el comportamiento dinámico del vehículo en distintas situaciones. *CarSim* permite predecir el rendimiento y la respuesta de los vehículos frente a las entradas de control del conductor en la dirección, acelerador, freno, embrague y cambio, en un entorno determinado y en una vía determinada, así como los coeficientes de fricción y viento.

Con él, se puede estudiar el cambio en el comportamiento del vehículo que resulta de la modificación de cualquiera de los cientos de parámetros del vehículo. *Carsim* permite la introducción de sistemas de control ABS, control de tracción y control de estabilidad de vehículos mediante algoritmos de control. Una de sus numerosas aplicaciones es la capacidad que tiene de complementarse con otros programas como *Simulink*, *vehicleSim* y *LabVIEW*. En este proyecto se empleará esa capacidad para complementar la simulación introducida en el programa *Carsim* mediante programación en *Simulink*.

## 6.2. IMPLEMENTACIÓN A TRAVÉS DE CARSIM

El programa *CarSim* tiene una interfaz inicial sencilla que facilita el uso del programa, véase figura 6.1. Se divide el programa en 5 partes para facilitar su comprensión

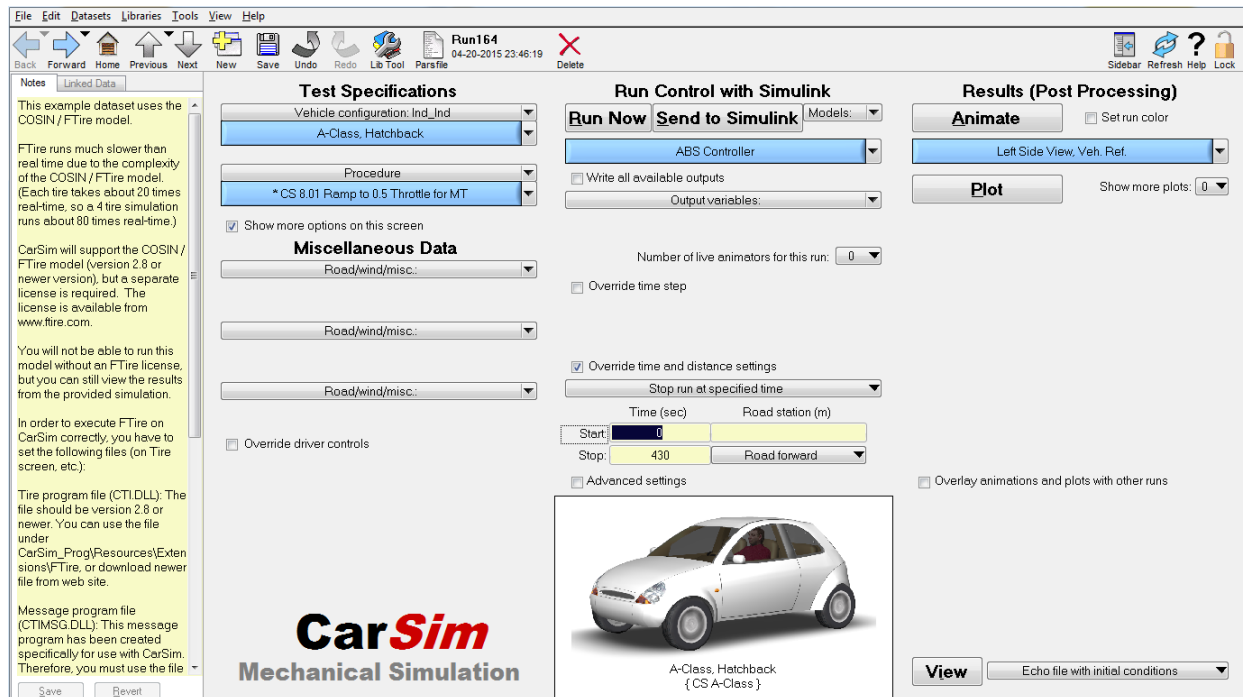


Figura 6.1 Interfaz inicial CarSim

1. **Comportamiento y datos físicos del vehículo:** este primer apartado influye sobre el aspecto, los datos físicos y el comportamiento del vehículo. A través de la interfaz inicial podemos acceder a modificar los datos físicos del vehículo, vease figura 6.2

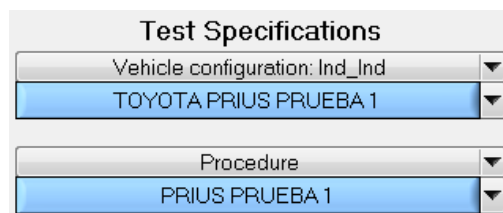


Figura 6.2: Apartado 1 CarSim

*CarSim* proporciona 17 clases de modelos de vehículo diferentes. Toyota Prius es un modelo clase C, lo que permite coger el modelo de serie de clase C proporcionado por el programa y configurarlo.

Para realizar el modelado del vehículo, *CarSim* divide en diferentes apartados todos los parámetros del vehículo, véase figura 6.3.

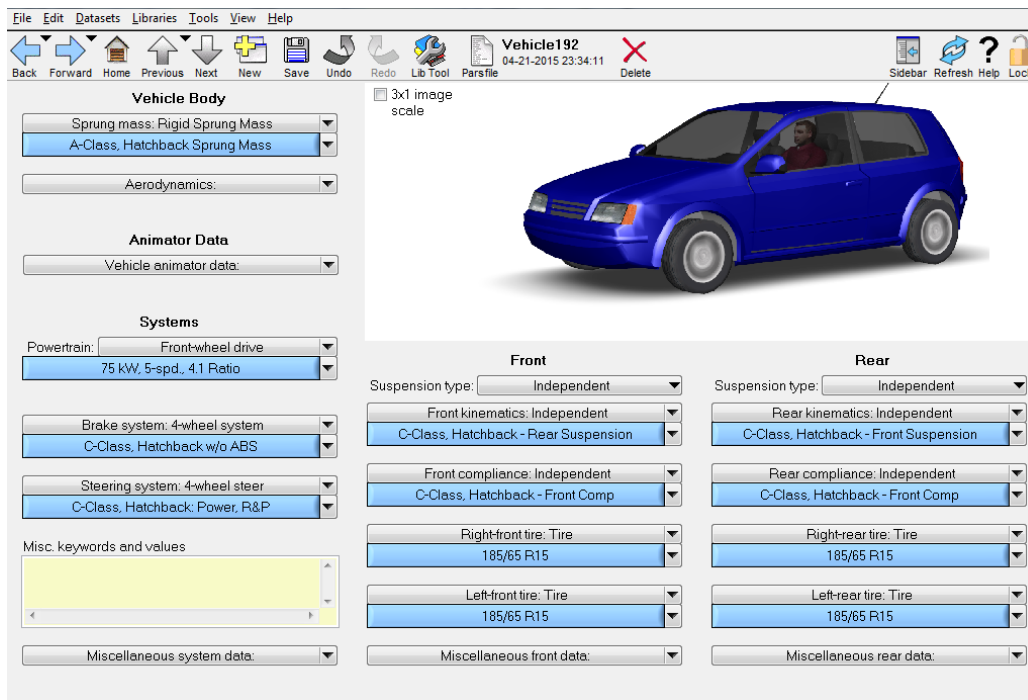


Figura 6.3: Pantalla Datos Físicos del vehículo Carsim.

Se introducen todos los datos físicos y técnicos del vehículo:

**Dimensiones principales:** permite introducir las dimensiones del vehículo, la masa y los momentos y productos de inercia.

En todos los apartados *CarSim* proporciona unos modelos genéricos para los vehículos de Clase C, pudiendo tomar estos modelos y configurar los aspectos que sean necesarios. Los valores principales introducidos para el modelado del vehículo se representan en la tabla 6.1.

Largo (mm)	4480
Ancho (mm)	1745
Alto (mm)	1490
Batalla (mm)	2700
Vía delantera (mm)	1525
Vía trasera (mm)	1520
Peso (kg)	1445
Altura del centro de gravedad (mm)	540
Distancia del centro de gravedad a eje delantero (mm)	999

*Tabla 6.1: Dimensiones principales*

A través de los valores iniciales para un vehículo de clase C, se depuran los momentos de inercia mediante diferentes pruebas realizadas, vease tabla 6.2.

$I_{xx} \left( \frac{kg}{m^2} \right)$	606.1
$I_{yy} \left( \frac{kg}{m^2} \right)$	1250
$I_{zz} \left( \frac{kg}{m^2} \right)$	1250

*Tabla 6.2: Momentos de inercia*

Los diferentes radios de giro, vease tabla 6.3, los calcula automáticamente el programa a través de la siguiente fórmula

$$R = \sqrt{\frac{I}{M}} [m]$$

I: momento de inercia por eje  $\left( \frac{kg}{m^2} \right)$ .

M: masa del vehículo (kg).

Rx (m)	0.648
Ry (m)	0.930
Rz (m)	0.930

*Tabla 6.3: Radios de giro*

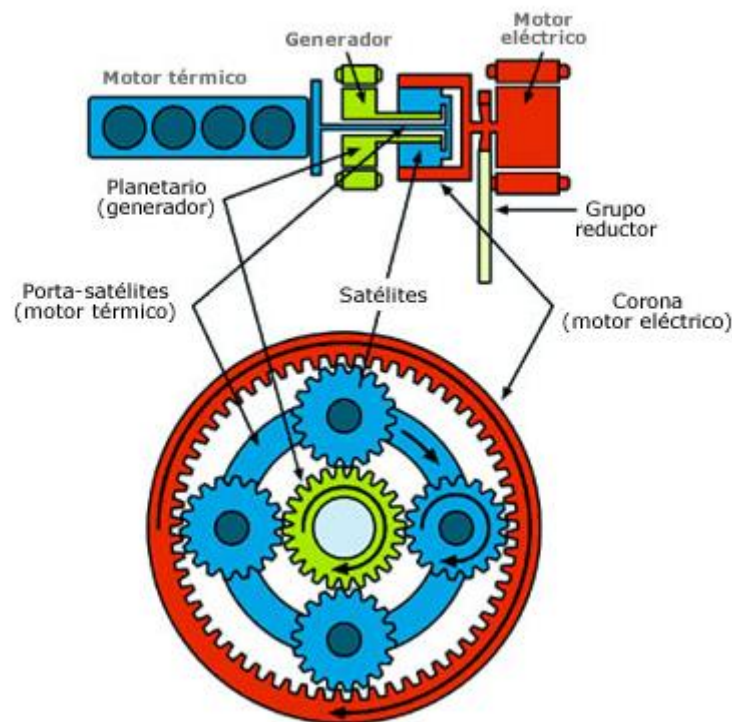
Datos Aerodinámicos: *CarSim* permite modificar la aerodinámica del vehículo. En este apartado se modifican los valores del coeficiente Cx, el área frontal, la longitud de referencia y se indica la densidad del aire, vease tabla 6.4

Área frontal ( $m^2$ )	1.746
Longitud de referencia (m)	2700
Coeficiente Cx	0.25
Densidad del aire ( $\frac{kg}{m^3}$ )	1.19

*Tabla 6.4: Datos aerodinámicos*

Tren de potencia: el modelado del tren de potencia, requiere una especial dificultad. El vehículo de estudio trabaja mediante un motor de combustión y un motor eléctrico, siendo este último de ayuda para el motor de combustión. Por lo tanto la potencia del vehículo varía en función del apoyo del motor eléctrico. Se indica en *CarSim* un par máximo de 125 kw entre los disponibles al ser este el más cercano al real.

Toyota Prius no dispone de una caja de cambios con diferentes engranajes para los cambios de marcha. El vehículo dispone de un engranaje planetario para transmitir el movimiento a las ruedas, vease figura 6.4.



*Figura 6.4: esquema del engranaje planetario utilizado en la transmisión*

La corona del engranaje planetario está solidariamente unida a las ruedas delanteras del coche. En un extremo está engranado el motor térmico y al otro un generador eléctrico. El giro del generador eléctrico puede ser mayor o menor en función de la resistencia que oponga, en función del tipo de desarrollo que se necesite.

Se toma una transmisión de 18 engranajes y 6 marchas debido a que es la que más aproxima los resultados a los reales.

Sistema de dirección: donde se puede modificar la geometría de la dirección así como las propiedades de la columna de dirección. Se toman los valores predefinidos para vehículos de Clase C y se van depurando en función de los resultados obtenidos en la simulación.

Sistema de suspensión: permite la configuración de manera independiente la suspensión delantera y la suspensión trasera. Se introducen los valores tanto de la vía delantera como de la vía trasera y se van aproximando las suspensiones para obtener resultados parecidos a la realidad.



Neumáticos: CarSim permite modelar cada uno de los neumáticos de manera independiente. Existen diferentes medidas de serie generadas por *CarSim*.

El vehículo Toyota Prius utilizado para las pruebas empleaba los neumáticos de serie de medidas 195/65 R15 89S con llantas de aleación. Dentro de los diferentes tipos que permite emplear *CarSim* se toma el modelo más cercano 185/65 R15 y se modifica el ancho del neumático y se depuran el resto de variables.

Sistema de frenado: permite introducir el par de frenado y la dosificación de la presión del fluido. Se aproxima el valor del par de frenado a través de diversas pruebas realizadas.

*CarSim* permite controlar el comportamiento del vehículo durante la simulación. Dentro de las numerosas variables que permite controlar, destacar el control sobre la velocidad, trayectoria de la simulación y el uso del sistema de frenado durante la misma. En el actual proyecto dichas variables son controladas mediante *Simulink* de manera externa, por lo que dichas casillas en el programa *CarSim* se dejan sin seleccionar para evitar interferencias entre datos duplicados.

Se ha de destacar la importancia de esta fase debido a que de ella dependen que los resultados sean positivos. Un buen modelado del vehículo acerca al objetivo final del proyecto, obteniendo resultados más cercanos a la realidad.

**2. Aspecto y características de la carretera:** en este segundo apartado el programa permite influir sobre el aspecto de la carretera, así como sus características y la representación visual de la simulación.

Se introducen los valores de coeficiente de rozamiento y resistencia a la rodadura, véase tabla 6.5.

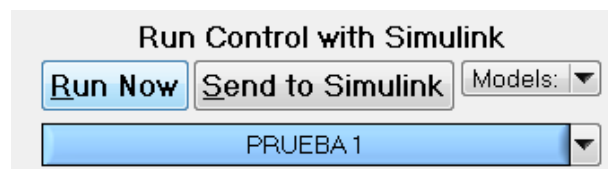
Coeficiente de rozamiento	0.85
Resistencia a la rodadura	0.009

*Tabla 6.5: Características carretera*

El valor del coeficiente de rozamiento se mantiene constante a lo largo de toda la simulación, debido a que las pruebas se hacen de manera continua y con asfalto seco, por lo que se toma un valor de 0.85 para la simulación completa.

**3. Modelo matemático de la simulación:** a través de este apartado se decide sobre el modelo matemático que calculará el comportamiento del vehículo. El programa tiene predefinidos una serie de modelos, los cuales se pueden emplear e incluso modificar.

El programa *Carsim* además de modelos predefinidos permite importar modelos de otros programas. Esta capacidad es la que se emplea para la realización del proyecto tomando un modelo generado previamente en el programa *Simulink*, véase figura 6.5.



*Figura 6.5: Combinación Carsim-Simulink*

Dentro de la pestaña del modelo importado, se encuentran las variables de entrada que importa el programa para su uso en la simulación y los parámetros de salida que se exportan al programa externo.

El programa permite importar numerosas variables de las cuales se tiene que elegir las variables deseadas, véase figura 6.6

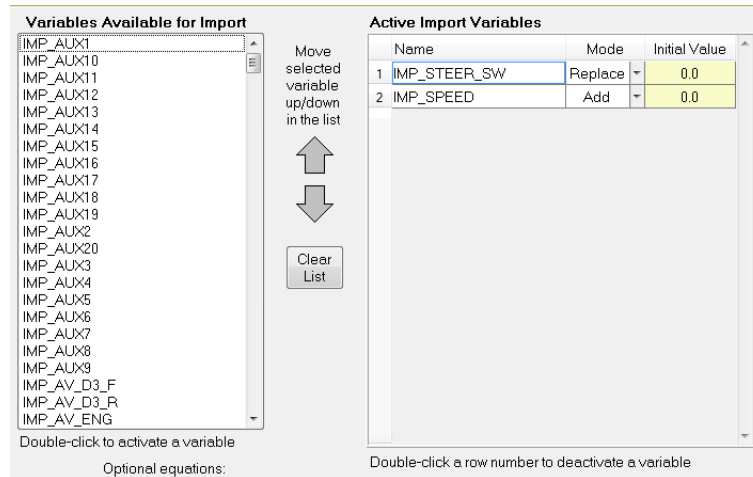


Figura 6.6: Importación de datos de Simulink a Carsim

Las variables que se importan de *Simulink* son la velocidad longitudinal y el steering del vehículo para el control de la trayectoria y velocidad de la simulación.

Las variables a exportar para su futura comparación con los datos obtenidos de *VBOX* son la velocidad de guiñada o Yaw Rate, el ángulo de deslizamiento y la aceleración lateral, véase figura 6.7.

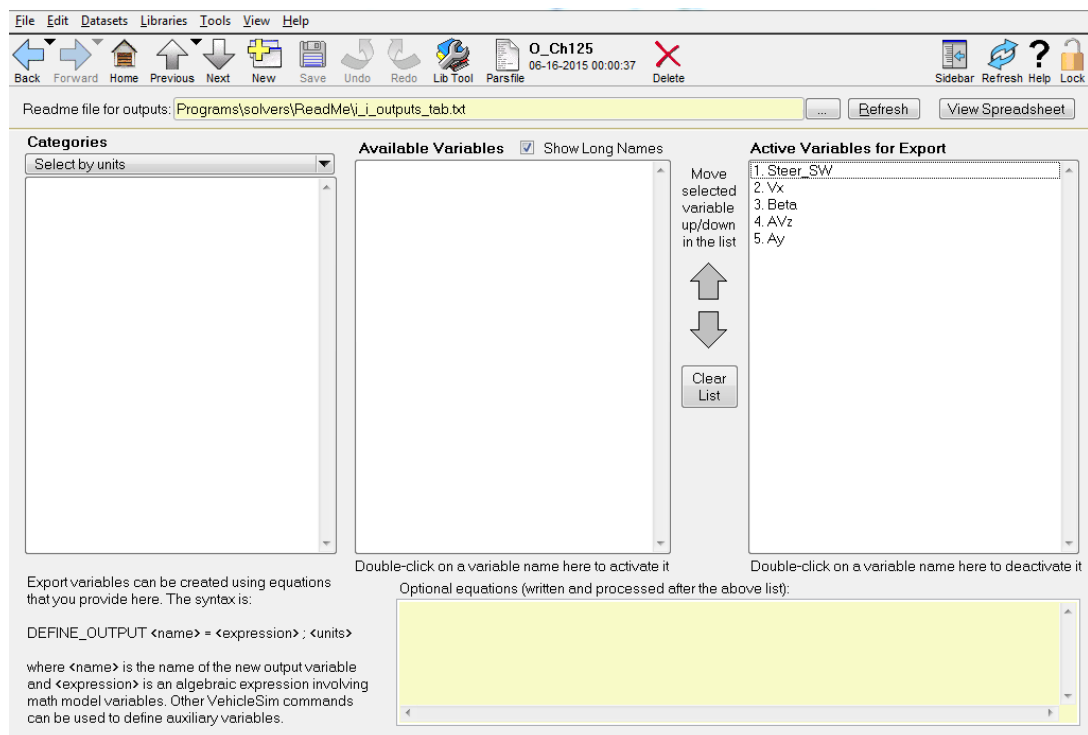


Figura 6.7: Exportación de datos de Carsim a Simulink

También se exportan la velocidad longitudinal y el steering del vehículo para comprobar si el vehículo simulado sigue a la perfección los valores de las variables de entrada.

El orden en el que se sitúan en la lista de variables elegidas es de vital importancia ya que tienen que situarse en la misma posición en la que se introducen y en la misma posición en las que deben exportarse. La posición en la que se sitúa cada variable viene definida por el diagrama de bloques generado en el programa *Simulink*. A la hora de comparar los resultados obtenidos, se ha de tener especial cuidado en controlar las unidades en las que se introduce cada valor en los parámetros mencionados.

**4. Posición, duración y número de vehículos de la simulación:** en este cuarto apartado el programa permite controlar el número de vehículos que aparecen en la simulación, la posición inicial del vehículo y la duración de la misma.

Se ajusta el tiempo de duración de la simulación a 410 segundos.

**5. Obtención de los resultados:** desde este apartado obtenemos la representación visual y grafica de la simulación realizada.

*CarSim* permite representar gráficamente numerosas variables de salida. En el actual proyecto las variables se comparan y se visualizan de manera gráfica en el programa *Simulink*, por tanto esta capacidad se emplea para la obtención y visualización de otros parámetros de manera rápida y eficaz.

A su vez, representa mediante un editor gráfico la simulación realizada, permitiendo controlar la cámara y su posición y la aparición de vehículos fantasma para facilitar el estudio, véase figura 6.8.



*Figura 6.8: Simulación cambio de sentido CarSim*

## 6.3. SOFTWARE SIMULINK

El programa Simulink genera un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos, el cual funciona bajo la plataforma Matlab. Es una herramienta muy útil para modelar, simular y analizar sistemas, tanto lineales como no lineales.

Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continuas de los sistemas generados. En el programa Simulink se encuentra un editor gráfico, una biblioteca de bloques personalizables y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. Este se integra con MATLAB®, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo más análisis.

La relación mediante bloques del sistema de estudio se realiza mediante el programa *Simulink*, véase figura 6.9.

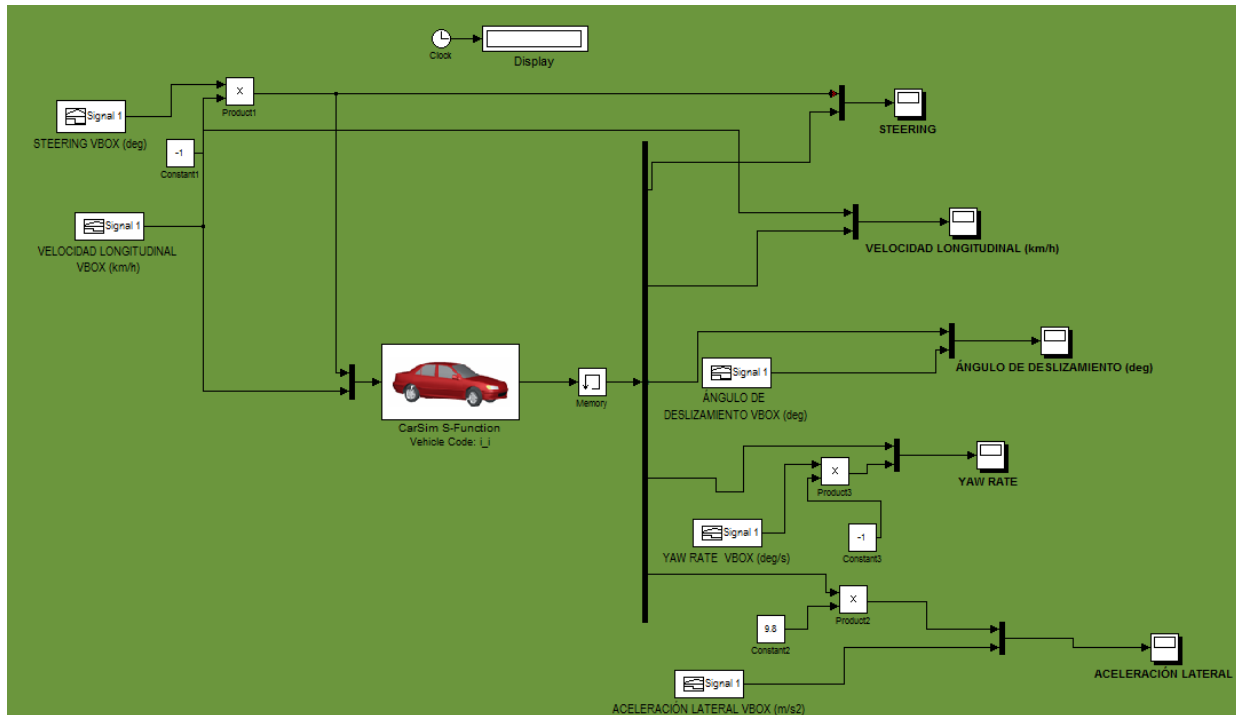


Figura 6.9: Diagrama de bloques programa Simulink

El programa ofrece un conjunto de bloques predefinidos que se pueden combinar a fin de crear un diagrama de bloques detallado del sistema. Las herramientas de modelado jerárquico, gestión de datos y personalización de subsistemas permiten representar hasta los sistemas más complejos de forma concisa y precisa.

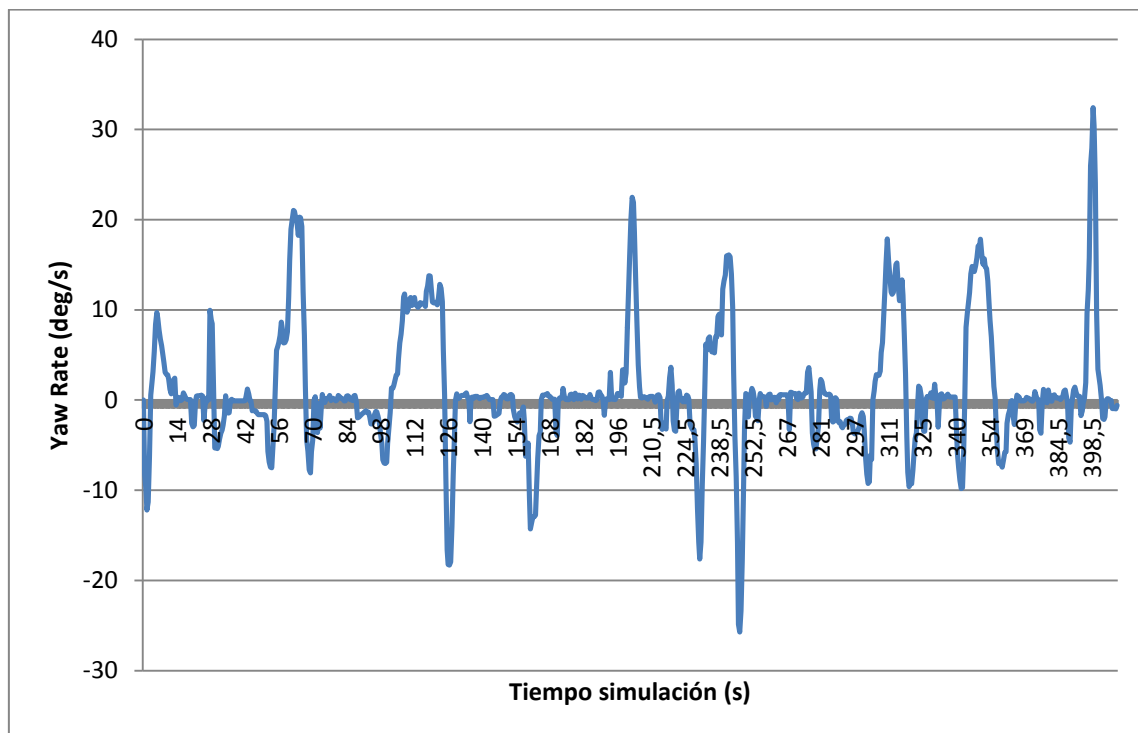
El diagrama final, figura 6.9, relaciona todos los parámetros del proyecto. Los parámetros *steering* y *velocidad longitudinal* de vehículo se introducen directamente en el bloque *CarSim*. Del bloque *CarSim* se exportan cinco salidas que son los parámetros medidos por el equipo VBOX y se representan gráficamente comparándolos con las variables obtenidas durante las pruebas.

Una vez definido el modelo se procede a su simulación. Es posible simular el comportamiento dinámico del sistema y ver los resultados a medida que se ejecuta la simulación. Para garantizar la velocidad y la precisión de la simulación, Simulink proporciona solvers de ecuaciones diferenciales ordinarias y un analizador de rendimiento de modelos.

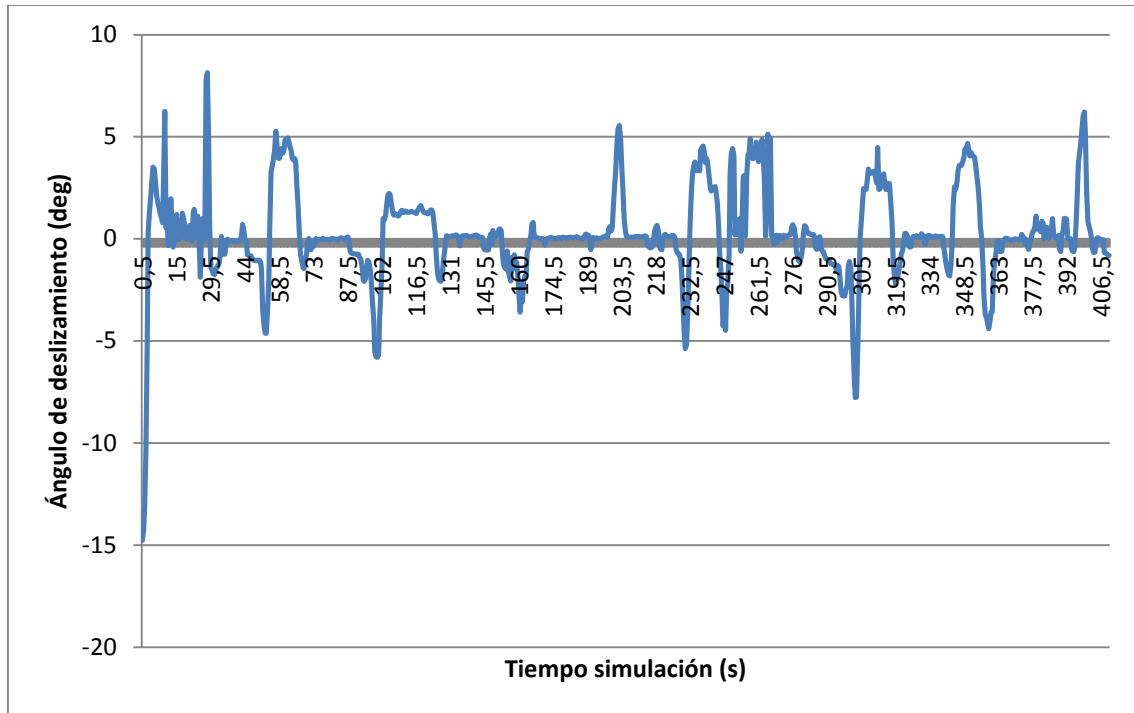
Los solvers son algoritmos de integración numérica que calculan la dinámica del sistema a lo largo del tiempo utilizando la información que contiene el modelo. El comportamiento de la simulación se puede visualizar observando las señales con las pantallas y scopes que ofrece Simulink.

## 6.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

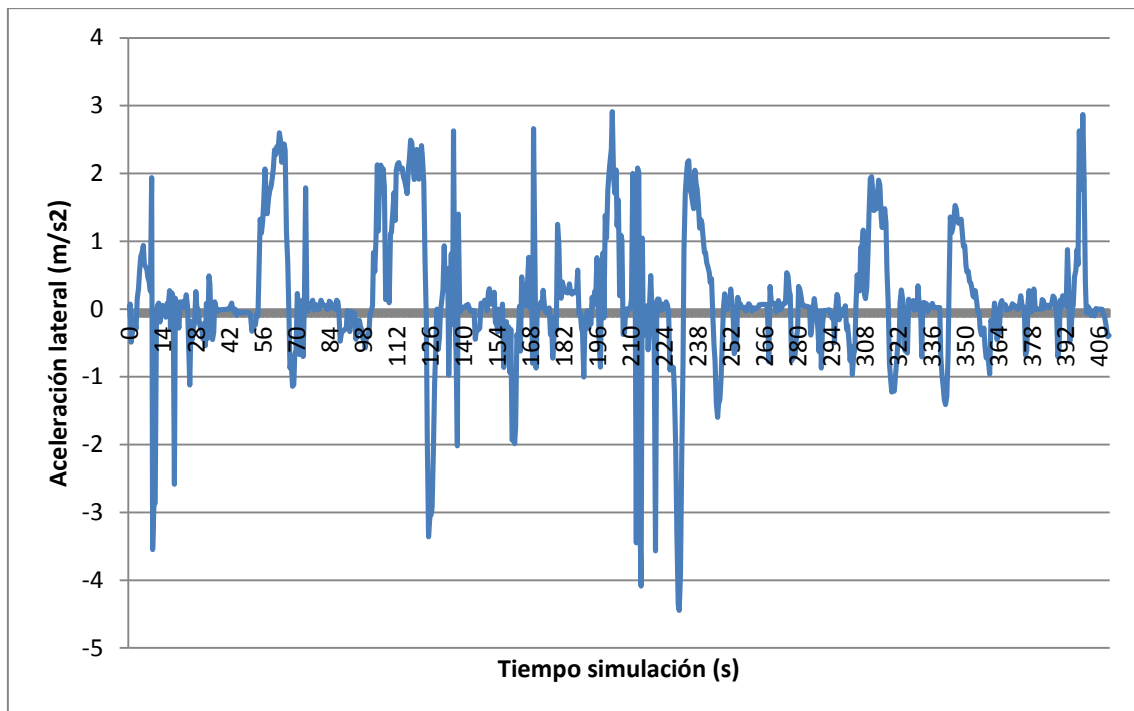
Los datos obtenidos tras la simulación se representan gráficamente a continuación. Los parámetros de estudio son la velocidad de guiñada o Yaw Rate, véase gráfica 6.1, el ángulo de deslizamiento, véase gráfica 6.2 y la aceleración lateral, véase gráfica 6.3.



Gráfica 6.1: Yaw Rate Simulación



Gráfica 6.2: Ángulo de deslizamiento Simulación



Gráfica 6.3: Aceleración lateral Simulación



## CAPITULO VII: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

---

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación realizando un estudio más amplio de las acciones más relevantes, es decir, aquellas acciones que influyen en mayor medida en la precisión de la definición del vehículo y su entorno.

Se comparan los resultados enfrentando los valores obtenidos de las variables del ángulo de deslizamiento, la aceleración lateral y la velocidad de guiñada de la simulación, con los obtenidos mediante el equipo *VBOX*. Para cuantificar los resultados, se calculan los porcentajes de error que se obtienen en los diferentes intervalos de tiempo.

La simulación se realiza mediante el programa *CarSim*. Para obtener valores lo más cercanos posibles a la realidad se han ido aproximando parámetros y depurando la programación. Se ha modelado el vehículo teniendo en cuenta la dificultad e imposibilidad de obtener ciertos datos más técnicos que las empresas automovilísticas no facilitan.

Como se ha comentado anteriormente, durante la simulación se han realizado el numerosos movimientos para realizar un estudio lo más completo posible del comportamiento dinámico del vehículo.

La simulación tiene una duración total de 410 segundos, donde se han medido valores cada 0.5 segundos. Para un estudio más preciso de los resultados obtenidos se divide la simulación en tres partes diferentes.

## 7.1 CASOS DE ESTUDIO

En cada caso de estudio, se explicará las condiciones en las que se realiza la prueba, se expondrán y se comprarán los resultados obtenidos entre las pruebas reales y la simulación.

Durante la simulación se realizan numerosos movimientos y constantes cambios de velocidad. En los siguientes apartados, el tiempo de simulación se divide en diferentes intervalos, dentro de los cuales se realizan actos significativos como: aceleraciones y frenazos bruscos, giros en rotonda, cambios de sentido, y giros en ambas direcciones

La división de las pruebas se muestra en la siguiente tabla, acotadas según los intervalos de tiempo entre los que se dan:

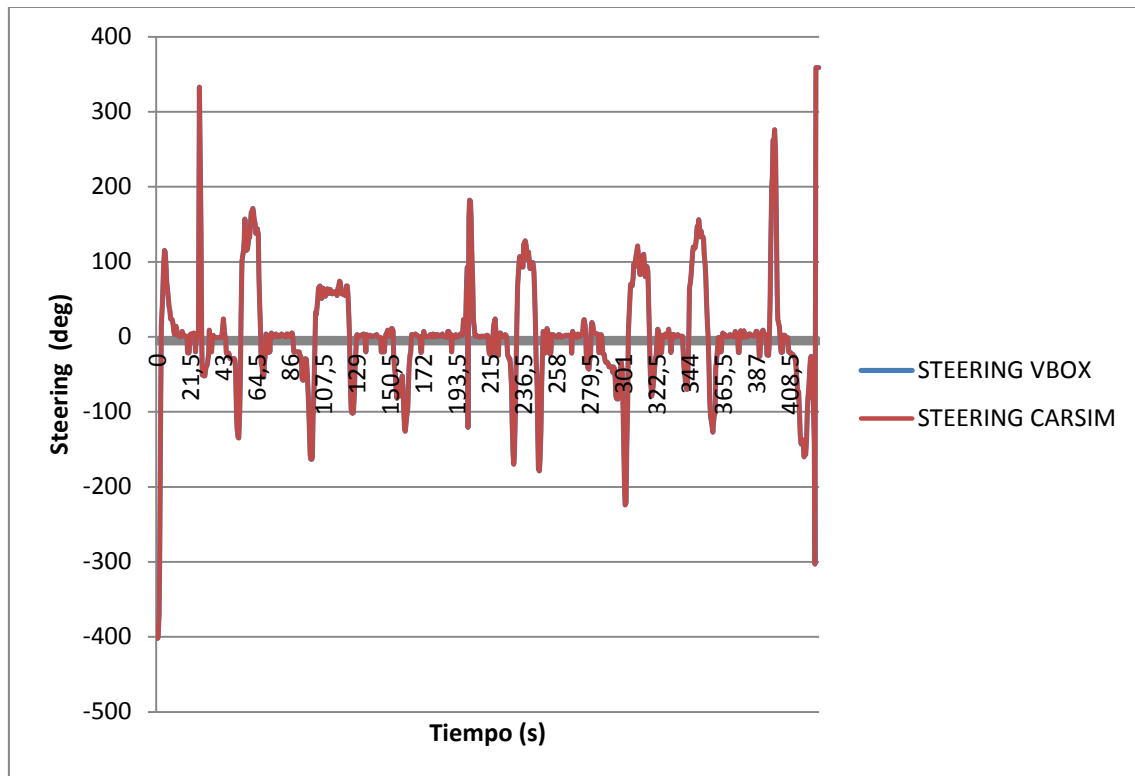
CASO	INTERVALO DE TIEMPO (s)	ASFALTO
1	0-150	Seco
2	150.5-285	Seco
3	285.5-410	Seco

*Tabla 7.1: Casos de estudio*

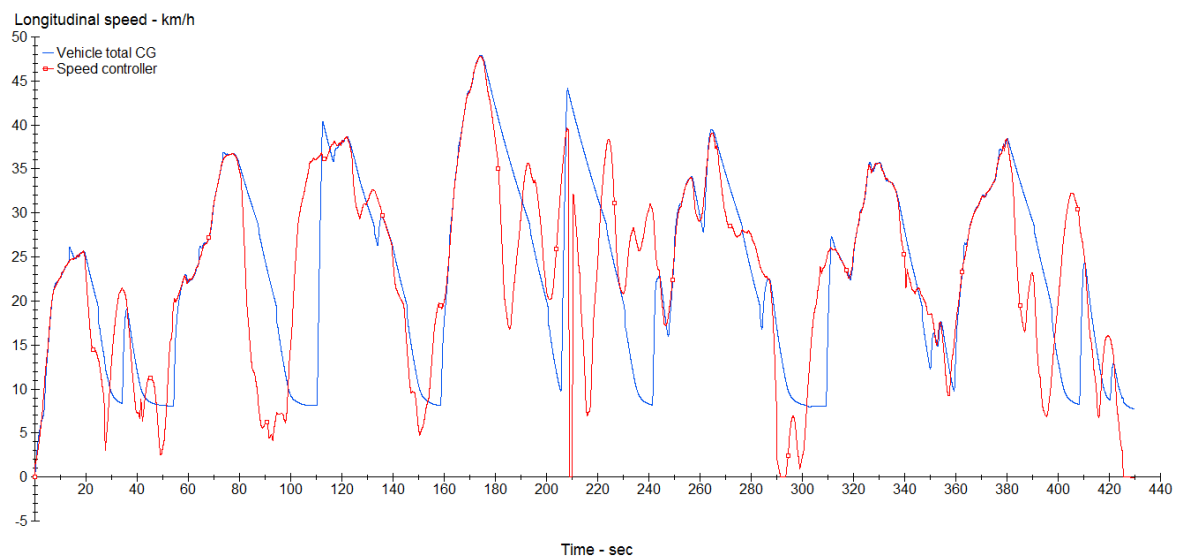
En todos los casos se expondrán los datos más significativos, que son la trayectoria seguida, los cambios de velocidad longitudinal, el ángulo de deslizamiento, la aceleración lateral y la velocidad de guiñada. Se compararán los valores obtenidos de la velocidad de guiñada, la aceleración lateral y el ángulo de deslizamiento en la simulación y en las pruebas reales.

Como se puede observar en la tabla 7.1, el asfalto en todos los casos se considera en estado seco. Las pruebas se han realizado de manera continuada en un mismo terreno y en un mismo día, por lo tanto al tener en el conjunto de la simulación un asfalto seco, se selecciona un coeficiente de rozamiento de 0.85 para todos los casos.

Los parámetros de entrada para la simulación se introducen al bloque CarSim, se comparan los valores introducidos con los valores realizados por la simulación, ver gráfica 7.1 y 7.2.



Gráfica 7.1: Steering VBOX-Steering CarSim



Gráfica 7.2: Velocidad longitudinal VBOX-Velocidad longitudinal CarSim

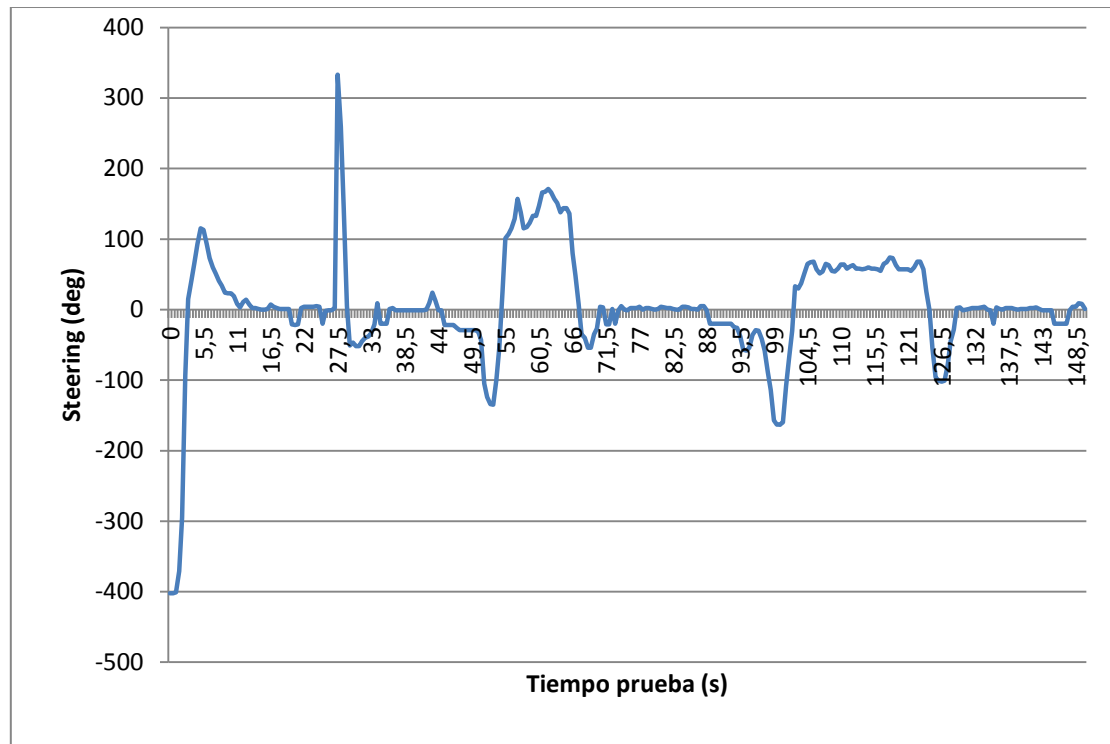
El programa aplica el parámetro del ángulo steering del vehículo empleando los mismos valores importados, ver gráfica 7.1. Estos se superponen unos a otros.

En el caso de la velocidad longitudinal, véase gráfica 7.2, se puede observar que los valores difieren entre sí, llevando una tendencia común. Esto puede ser debido a diferencias en diferentes factores, como pueden ser: un insuficiente modelado de las características del motor, ya que el vehículo de estudio es un híbrido en el que trabajan motor eléctrico y motor de combustión interna no siempre trabajando de manera simultánea, o un diferente momento en el cambio de la marcha del vehículo generando ciertas disminuciones de velocidad al realizar el cambio. Esto puede generar variaciones posteriores en los resultados, ya que la simulación no se realiza exactamente con la misma velocidad longitudinal que las pruebas reales.

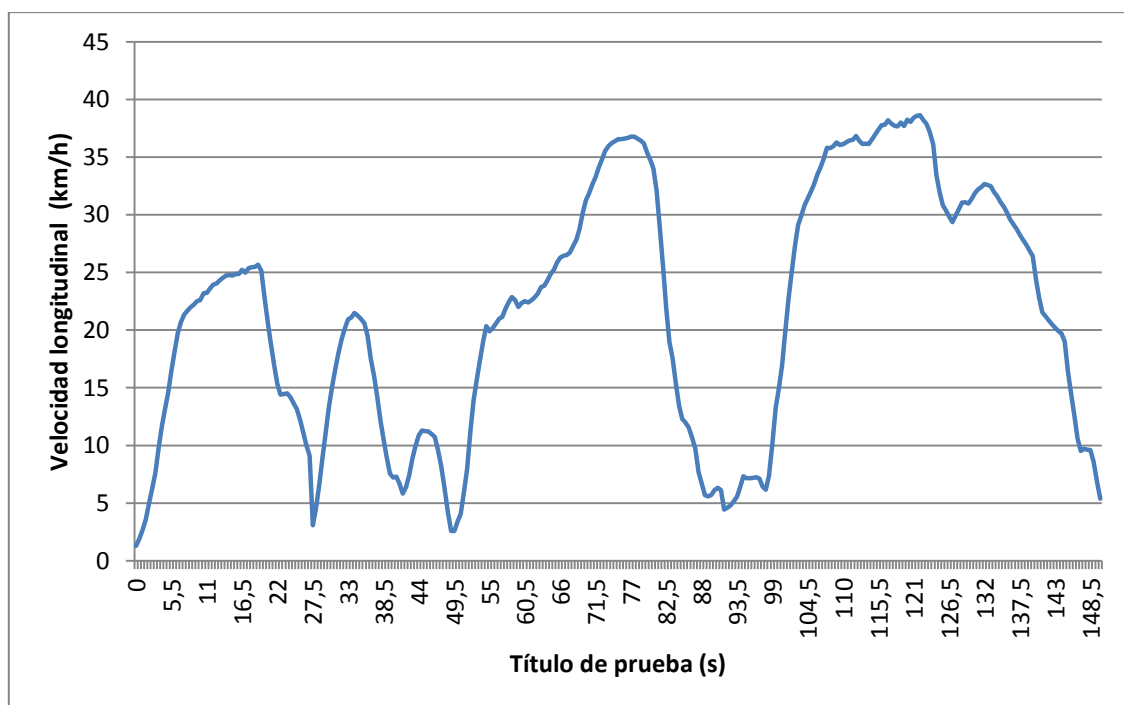
### 7.1.1. CASO DE ESTUDIO 1

---

Para un análisis de los movimientos realizados en este primer intervalo de tiempo se representa gráficamente las variables empleadas para el control de la trayectoria, ver gráfica 7.3, y velocidad de la simulación, ver gráfica 7.4.



Gráfica 7.3: Ángulo Steering caso de estudio 1



Gráfica 7.4: Velocidad longitudinal del vehículo caso de estudio 1

En este primer tramo se realizan tres movimientos destacados, véase tabla 7.2, en los cuales puede influir en mayor medida la correcta modelación del vehículo. Se realiza un análisis más detallado de los mismos.

Intervalo de Tiempo (s)	Manobra realizada
[26.5-32]	Giro brusco
[44-71.5]	Cambio de sentido en rotonda
[88-134]	Giro en rotonda 90º

*Tabla 7.2: Caso 1 movimientos destacados*

#### Giro brusco.

En este tramo se realiza un giro brusco acompañado de una deceleración pronunciada, ver imagen 7.1. Después se representan las variaciones de las variables de entrada, ver tabla 7.3. Para completar el apartado, se exponen la comparación de la velocidad de guiñada o Yaw Rate, ver gráfica 7.5, el ángulo de deslizamiento, ver gráfica 7.6 y la aceleración lateral, véase gráfica 7.7.

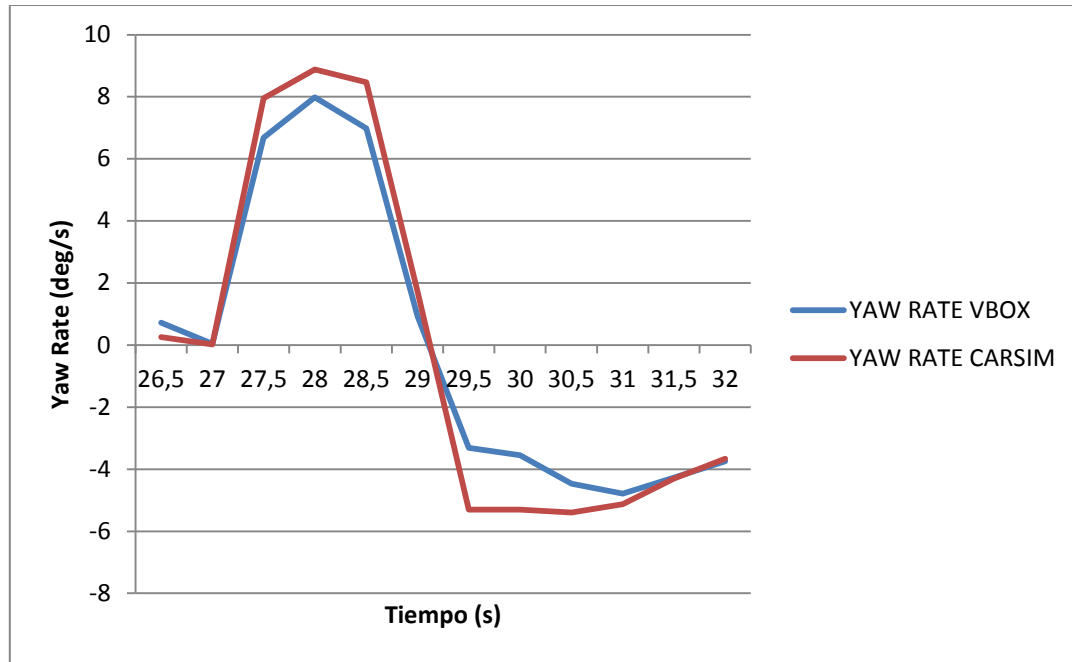


*Imagen 7.1: Giro brusco*

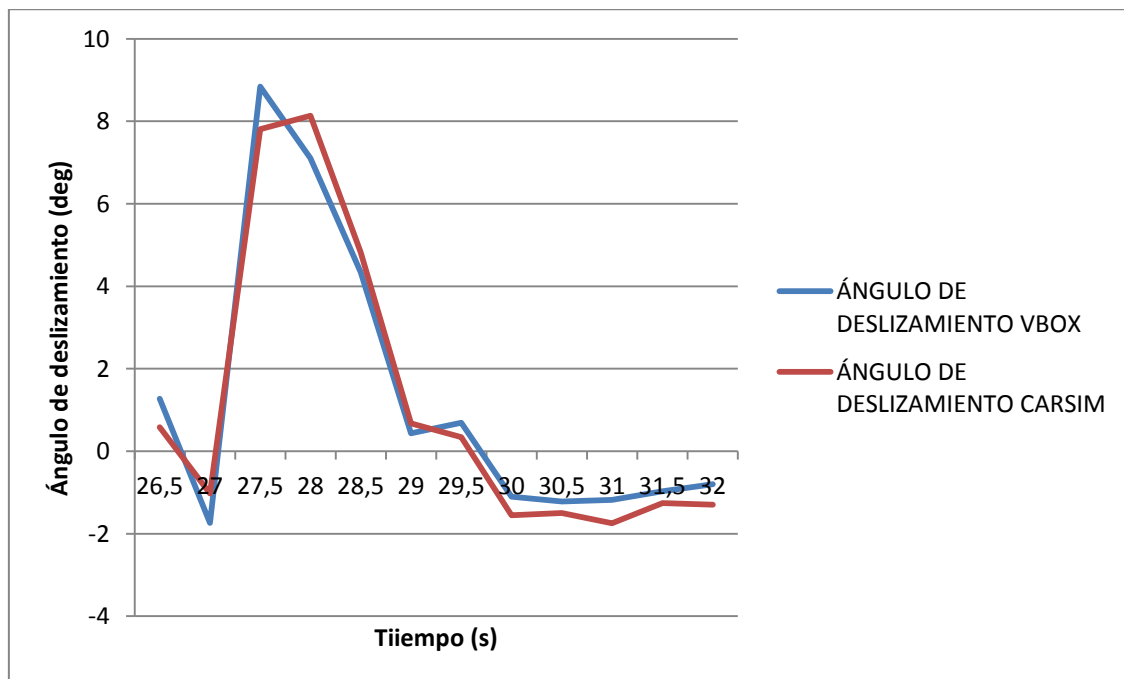
TIEMPO (s)	VELOCIDAD LONGITUDINAL VEHÍCULO (km/h)	STEERING (Deg)
26,5	10	-1
27	9,11	2
27,5	3,07	333
28	4,59	259
28,5	6,58	144
29	8,91	5
29,5	11,08	-51
30	13,3	-47
30,5	15,06	-52
31	16,59	-52
31,5	18	-45
32	19,19	-40

*Tabla 7.3: Variables entrada intervalo [26.5-32] s*

Como se observa en la tabla 7.3, en el segundo 27 se realiza un cambio de velocidad y un giro de volante pronunciado en tan solo medio segundo. Este cambio de dirección de manera imprevista puede generar variaciones entre el modelo simulado y el vehículo real, al intervenir en mayor medida factores como la suspensión y el modelo de neumático.

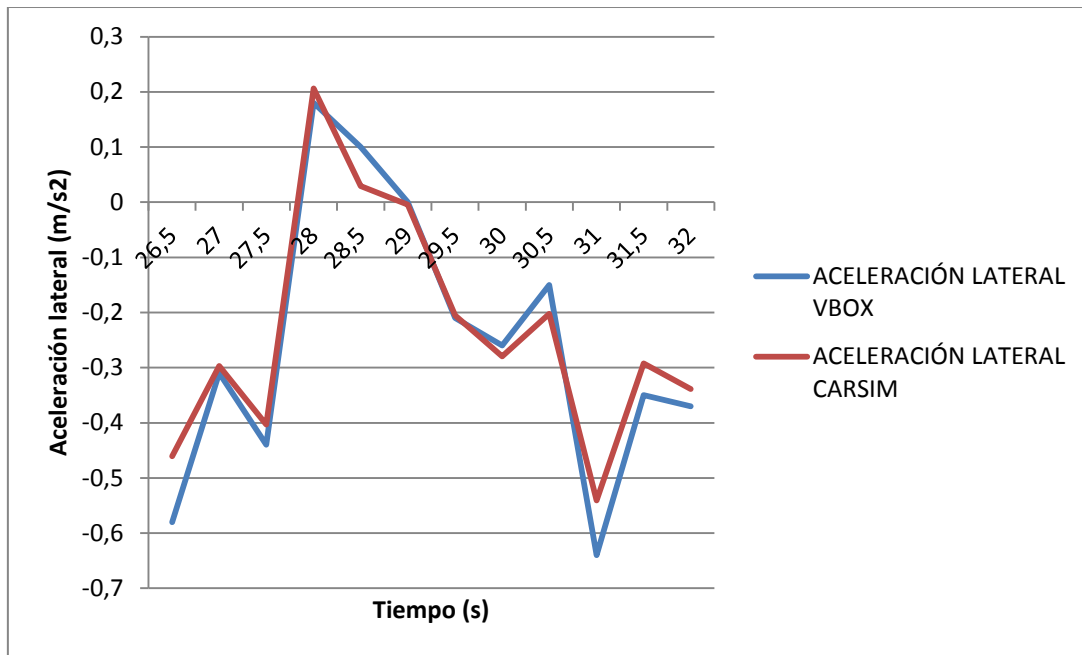


Gráfica 7.5: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [26.5-32] segundos



Gráfica 7.6: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [26.5-32] segundos





*Gráfica 7.7: Comparación valores aceleración lateral VBOX con aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [26.5-32] segundos*

En la gráfica 7.5, se representa la comparación entre los valores del Yaw Rate obtenidos mediante el equipo de medición VBOX y el software *CarSim* durante el giro brusco realizado. Ambos mantienen un comportamiento similar y correcto en función de la maniobra realizada.

En la gráfica 7.6 donde se muestra la comparación entre el ángulo de deslizamiento, se observan valores más próximos entre sí a lo largo del rango de tiempo estudiado.

En la gráfica 7.7, se muestra la comparación entre los valores de la aceleración lateral obtenidos. Se observa una tendencia común, con valores próximos entre sí.

En estas condiciones el vehículo mantiene un comportamiento cercano a la realidad en todos los parámetros estudiados.

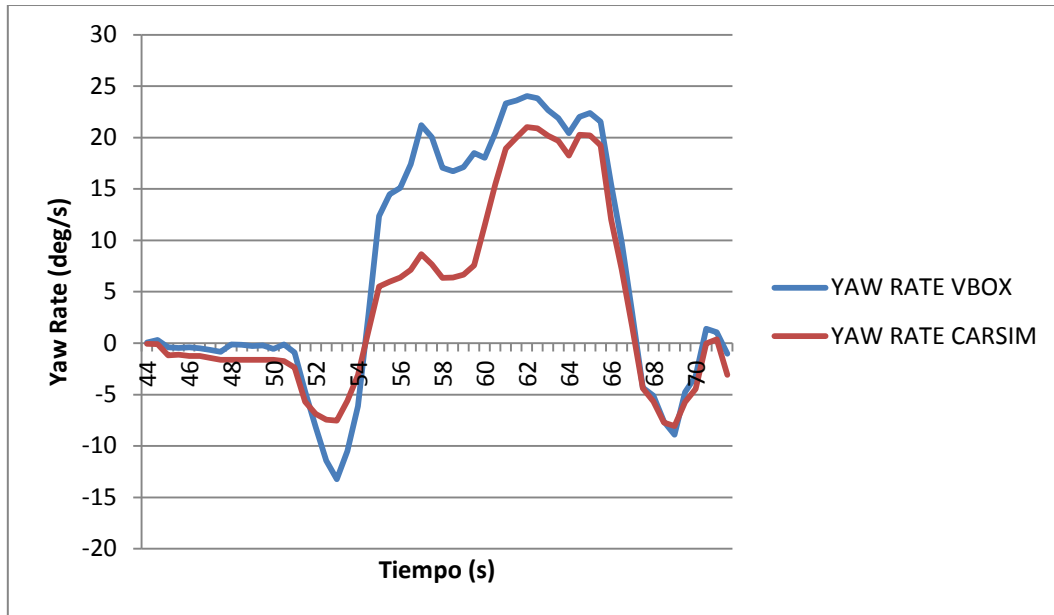
### Cambio de sentido en rotonda.

Entre el segundo 44 y el 71.5 se realiza un cambio de sentido en una rotonda. Primero se representa de manera gráfica el cambio de sentido realizado, ver imagen 7.2. Acto seguido se comparan gráficamente los valores obtenidos del Yaw Rate, ver gráfica 7.8, del ángulo de deslizamiento, ver gráfica 7.9 y de la aceleración lateral, ver gráfica 7.10.

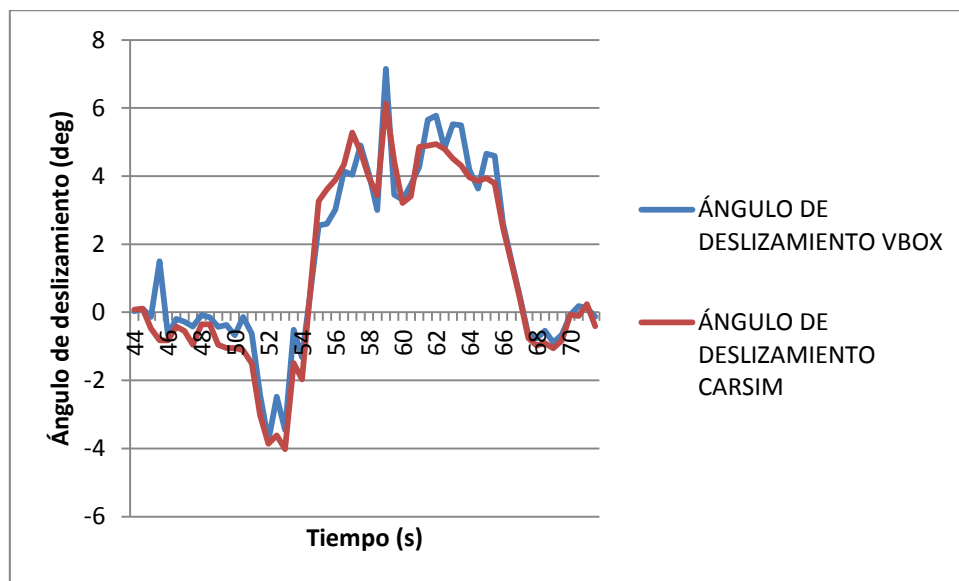


*Imagen 7.2: Cambio de sentido en rotonda.*

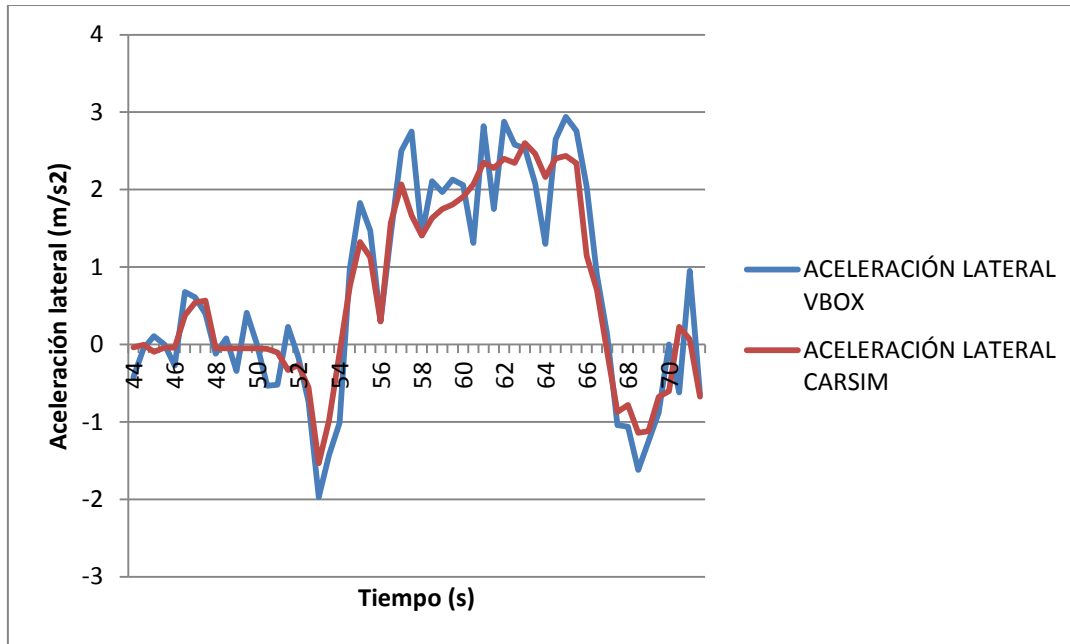
En este apartado no se realiza ningún cambio de velocidad brusco, ver gráfica 7.4., ni ningún giro fuera de lo común para este tipo de movimientos, ver gráfica 7.3. Se realiza un cambio de sentido en una rotonda en condiciones de conducción habitual.



Gráfica 7.8: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [44-71.5] segundos



Gráfica 7.9: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [44-71.5] segundos



*Gráfica 7.10: Comparación valores de la aceleración lateral VBOX con la aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [44-71.5] segundos*

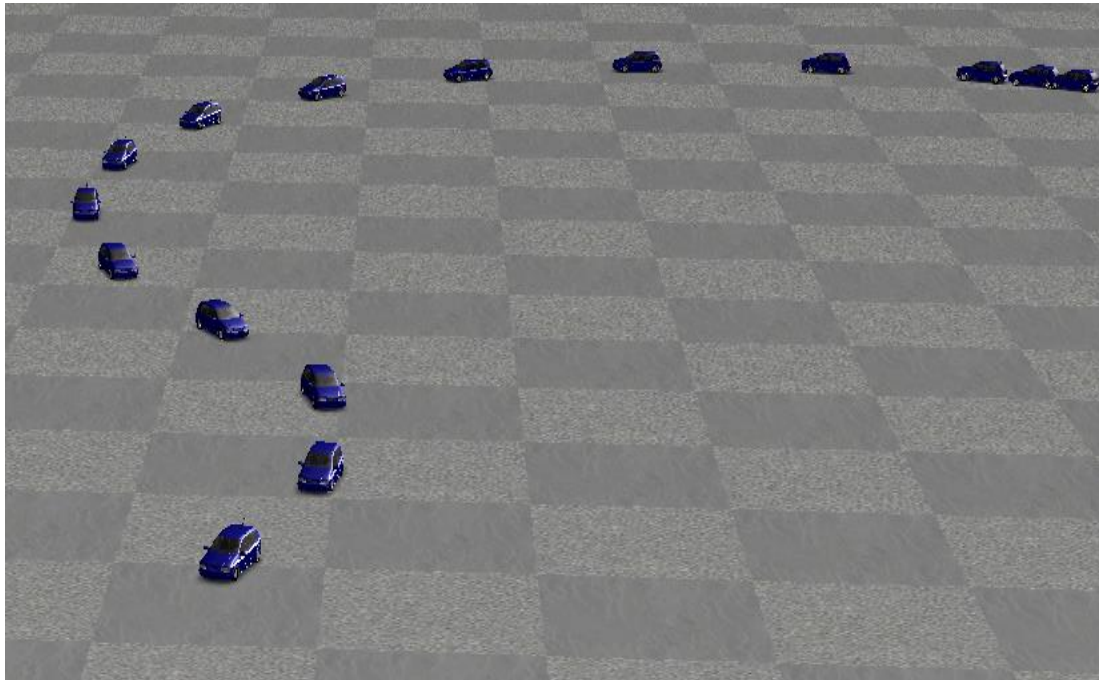
El parámetro Yaw Rate, mantiene una simulación cercana a la realidad, exceptuando el primer tramo de la rotonda donde los valores difieren en gran medida entre sí.

En las gráficas 7.9 y 7.10 se comparan los resultados obtenidos para el ángulo de deslizamiento y para la aceleración lateral del vehículo. Los resultados obtenidos mantienen en ambos casos una tendencia similar con valores cercanos entre sí para la situación estudiada.

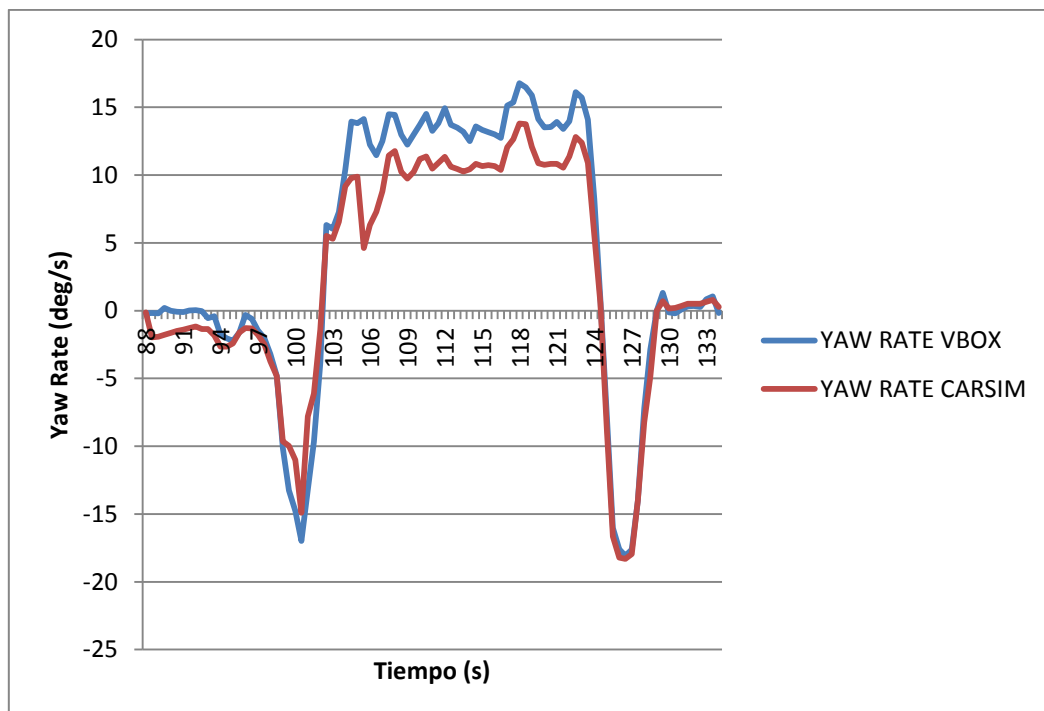
#### Giro en rotonda 90°

Analizando el intervalo de tiempo que va desde el segundo 88 hasta el 134, se realiza un giro en una rotonda a 90°. Se representa de manera gráfica el movimiento realizado, ver imagen 7.3. Después se comparan gráficamente los valores obtenidos del Yaw Rate, ver gráfica 7.11, del ángulo de deslizamiento, ver gráfica 7.12 y de la aceleración lateral, ver gráfica 7.13

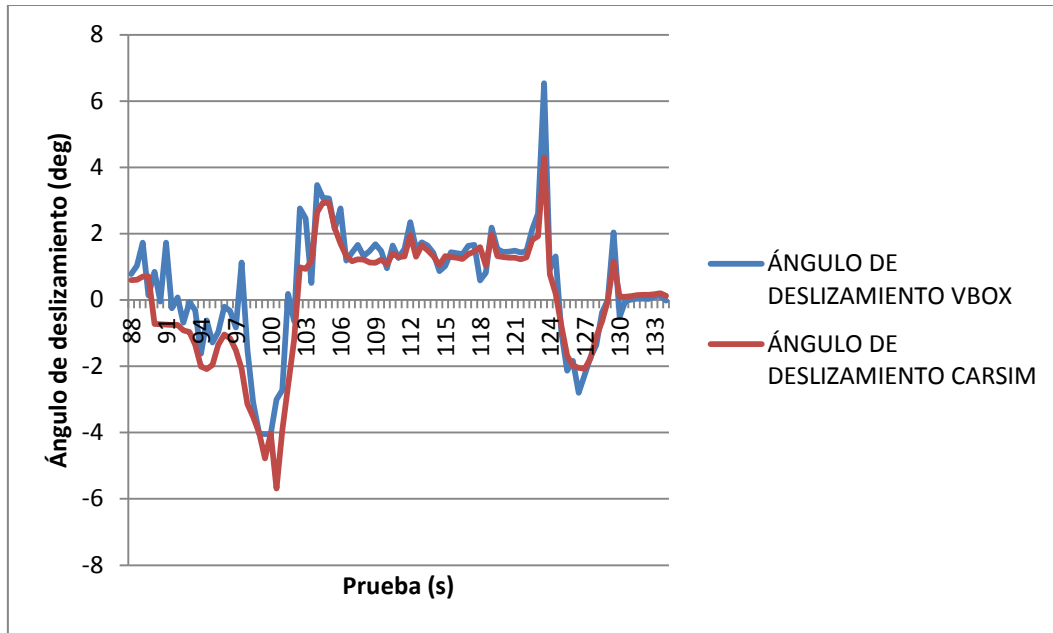
En la gráfica 7.4, se observa que no se realiza ningún tipo de variación de velocidad pronunciada. El vehículo mantiene una trayectoria curva constante, ver gráfica 7.3. El movimiento se realiza en condiciones normales para este tipo de maniobras.



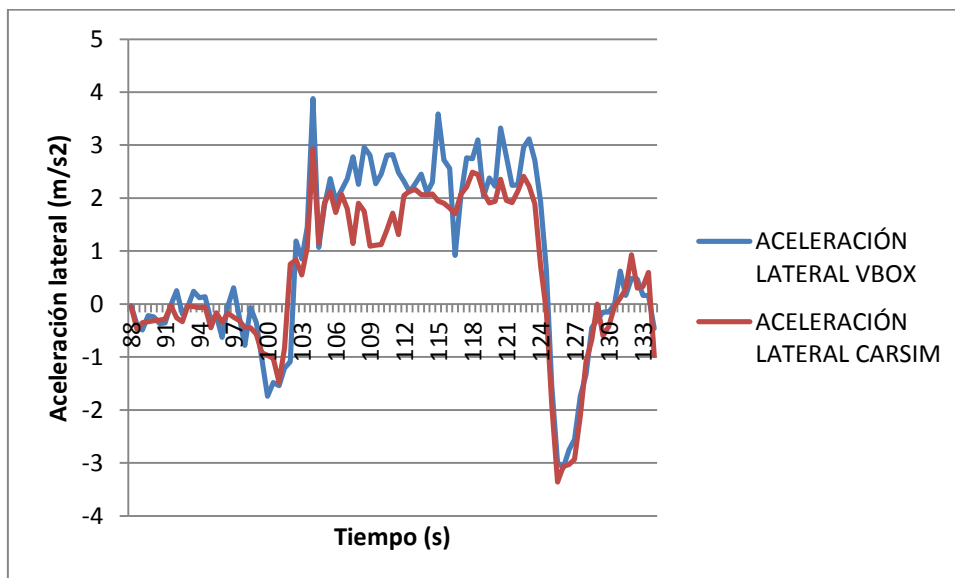
*Imagen 7.3: Giro en rotonda 90°*



*Gráfica 7.11: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [88-134] segundos*



Gráfica 7.12: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [88-134] segundos



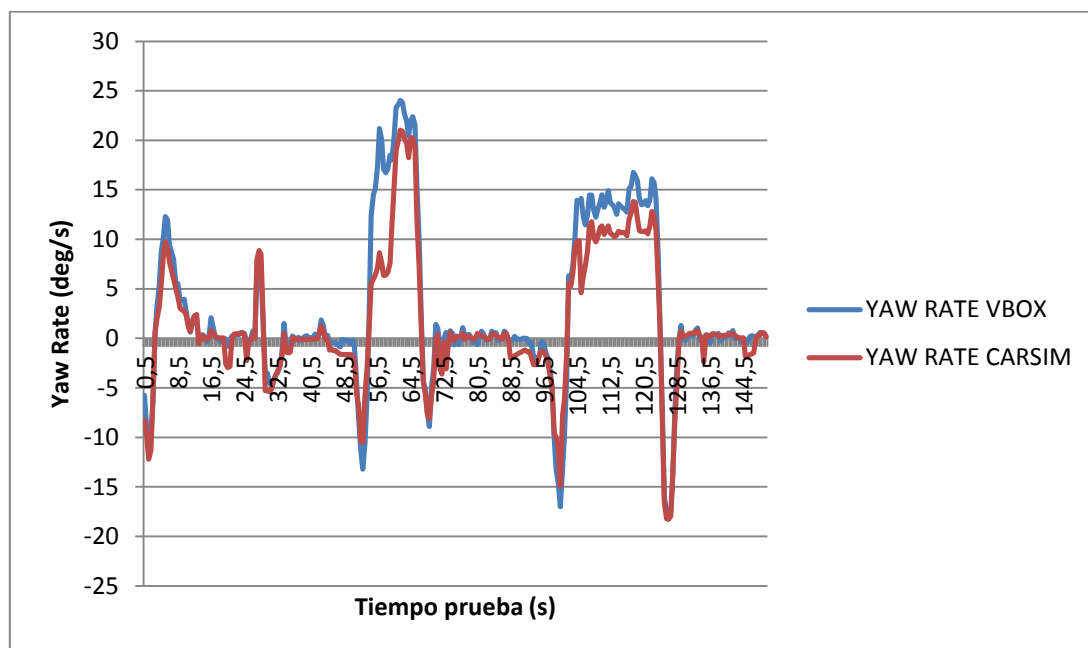
Gráfica 7.13: Comparación valores de la aceleración lateral VBOX con la aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [88-134] segundos

En las gráficas 7.11 y 7.12 se comparan los resultados obtenidos entre la simulación y la prueba real para Yaw Rate y para el ángulo de deslizamiento. La gráfica 7.13 compara los valores obtenidos para la aceleración lateral que se da a lo largo de la trayectoria realizada.

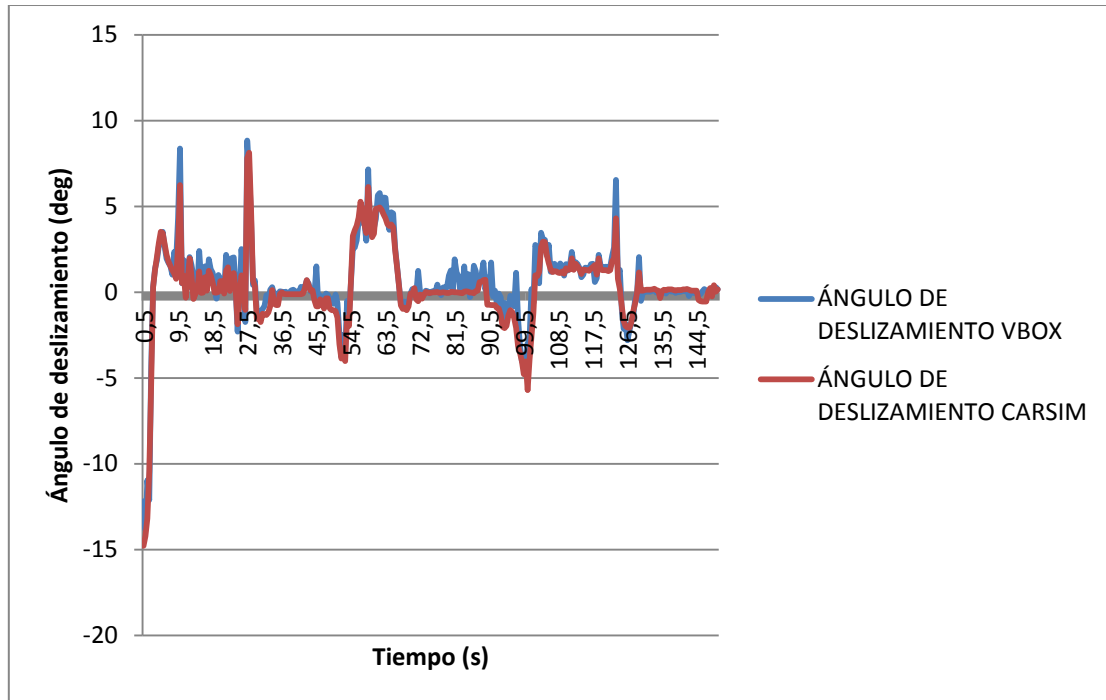
En la situación de realizar una rotonda con un giro de 90°, la tendencia de los valores se mantiene a lo largo del recorrido. Los parámetros ángulo de deslizamiento y aceleración lateral tienen una pequeña diferencia con los valores reales al comienzo de la maniobra, manteniendo después un comportamiento cercano a la realidad. El parámetro Yaw Rate mantiene una gran proximidad con los resultados obtenidos de la experimentación real.

#### Recorrido completo caso de estudio 1.

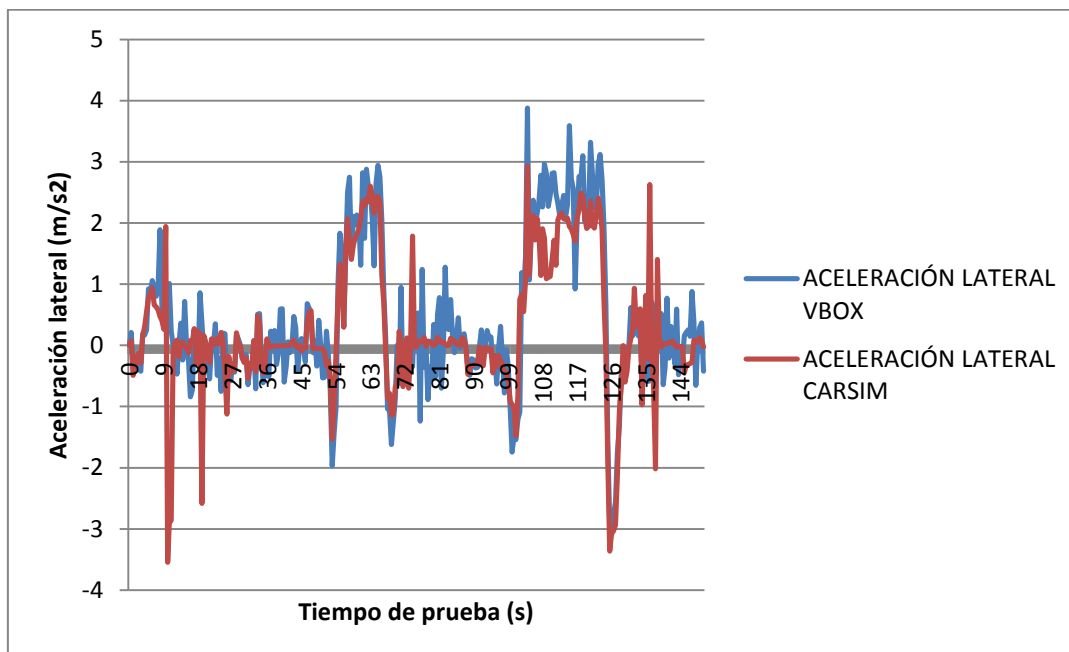
Para completar el primer caso, se representa gráficamente la comparación de los valores obtenidos del Yaw Rate, ver gráfica 7.14, del ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.15 y de la aceleración lateral, ver gráfica 7.16. Se realiza un análisis final del recorrido total, incluyendo los tramos que se han quedado fuera de análisis en las tres acciones anteriores.



Gráfica 7.14: Comparación Yaw Rate caso de estudio 1



Gráfica 7.15: Comparación Ángulo de deslizamiento caso de estudio 1



Gráfica 7.16: Comparación Aceleración lateral caso de estudio 1



En la gráfica 7.14 se representa la comparación de los resultados obtenidos para el Yaw Rate del vehículo mediante la simulación y la prueba real. Se observa que el resultado de la simulación se asemeja a los valores obtenidos mediante el equipo VBOX.

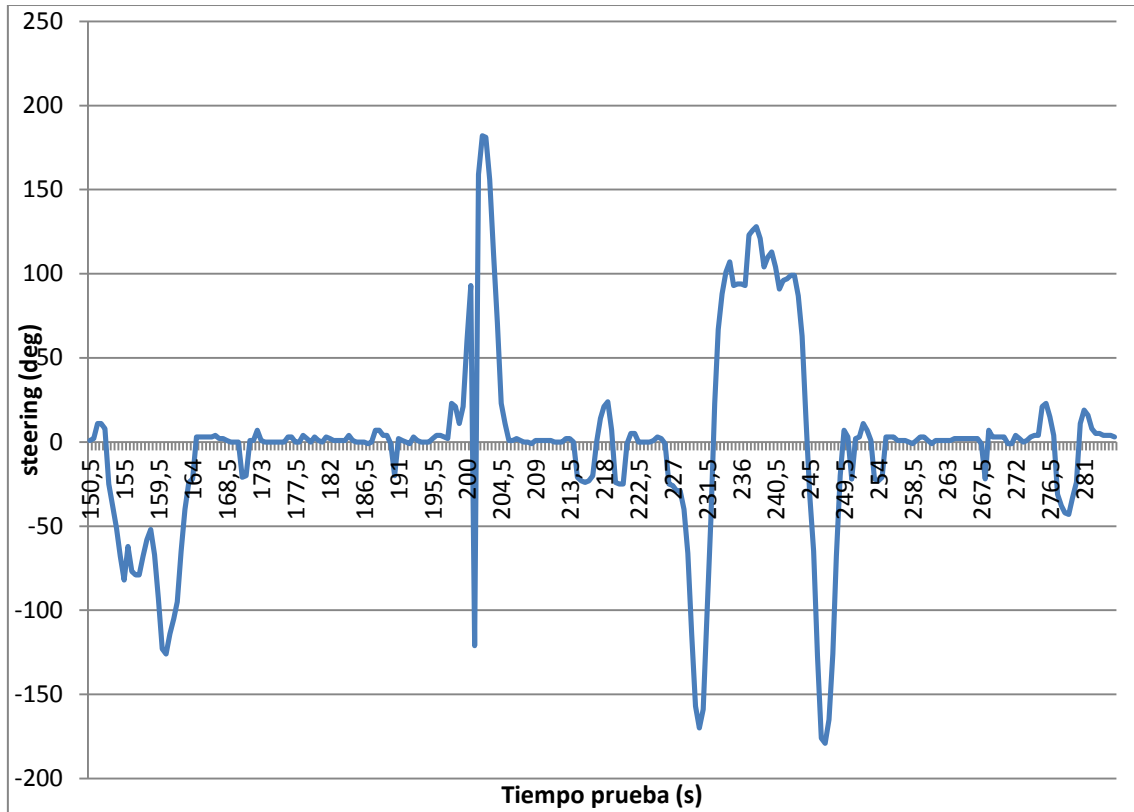
La comparación de los resultados obtenidos del ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.12, representa unos valores cercanos entre sí. Destacar que en los tramos de recorrido recto, el equipo de medición VBOX genera una variación de valores representada gráficamente mediante picos, que en la simulación se mantiene uniforme.

Los valores obtenidos en la simulación de la aceleración lateral, véase gráfica 7.16, mantienen una tendencia común con los valores medidos mediante VBOX. En tramos con trayectoria constante con leves giros de volante, el equipo de medición VBOX mide unos picos que el vehículo simulado no alcanza a obtener.

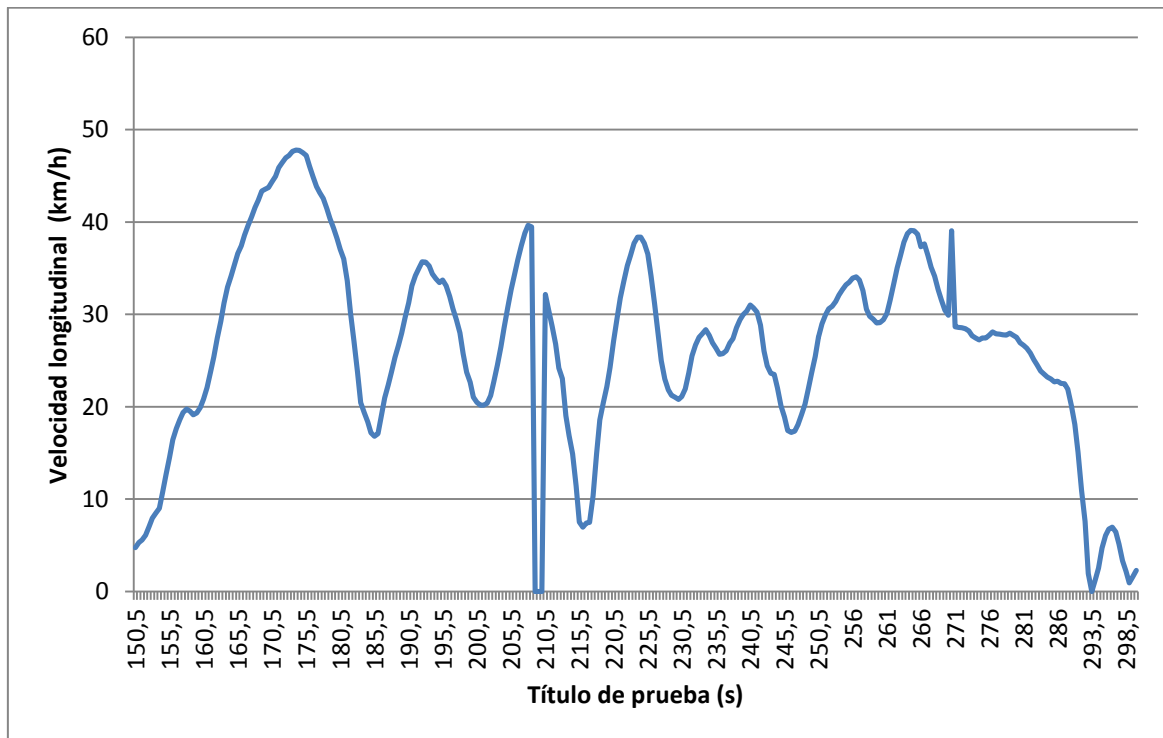
## 7.1.2. CASO DE ESTUDIO 2

---

El segundo tramo viene definido por las acciones que se realizan en el rango de tiempos de [150,285] segundos. Para analizar los movimientos realizados se representa gráficamente el steering del vehículo, ver gráfica 7.17, y la velocidad longitudinal del mismo, véase gráfica 7.18.



Gráfica 7.17: Ángulo Steering caso de estudio 2



Gráfica 7.18: Velocidad longitudinal del vehículo caso de estudio 2

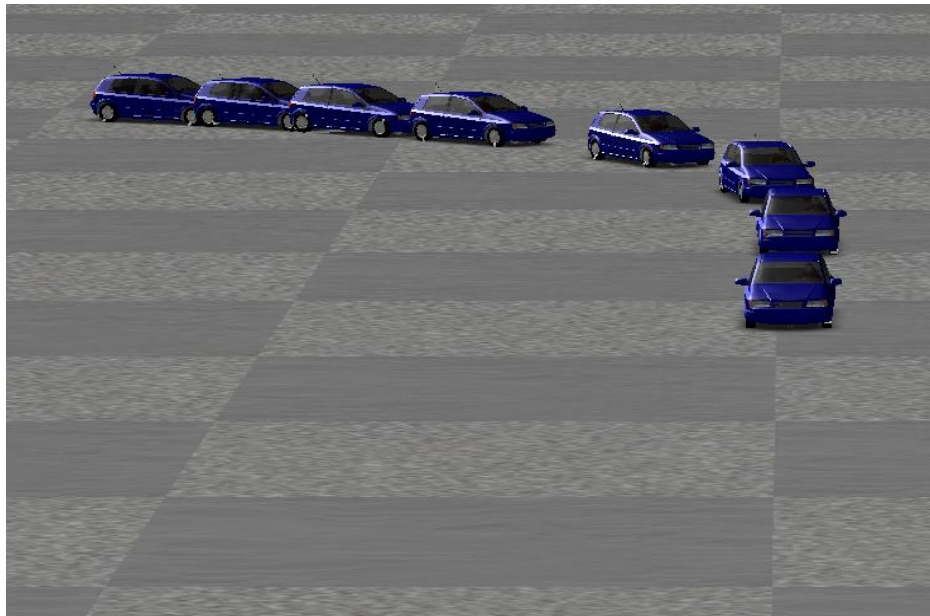
Durante este intervalo de tiempo se realizan una serie de acciones detalladas, ver tabla 7.4.

Intervalo de Tiempo (s)	Manobra realizada
[150.5-165]	Giro a derechas 90º
[195-212]	Giro a izquierdas 90º
[222-253]	Paso por rotonda

*Tabla 7.4: Caso 2 movimientos destacados*

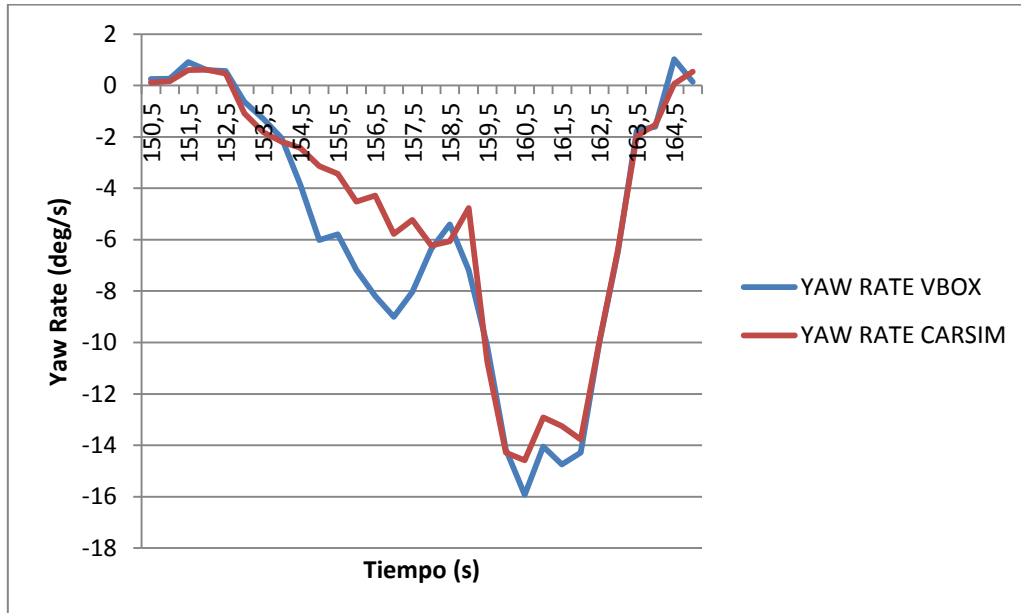
#### Giro a derechas 90º

En este caso se simula un giro a derechas durante una aceleración progresiva comenzando en una velocidad de 4.76km/h. El primer resultado que se coloca es la imagen obtenida de la simulación durante este tramo, véase imagen 7.4. Para cerrar el apartado se exponen gráficamente la comparación de los resultados obtenidos de las variables Yaw Rate, véase gráfica 7.19, ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.20 y aceleración lateral, ver gráfica 7.21.

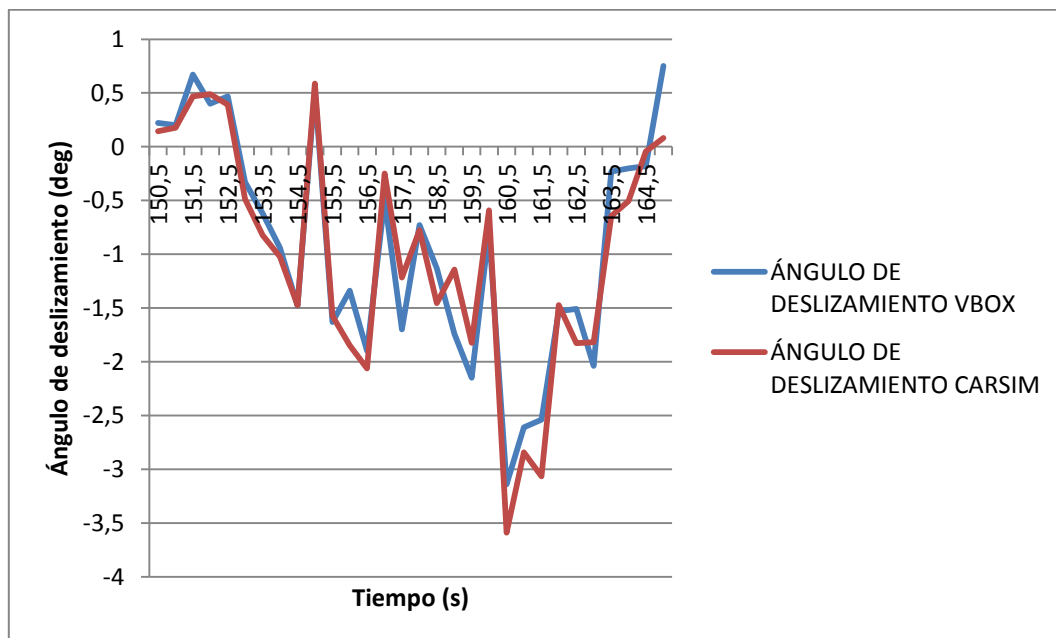


*Imagen 7.4: Giro a derechas 90º*

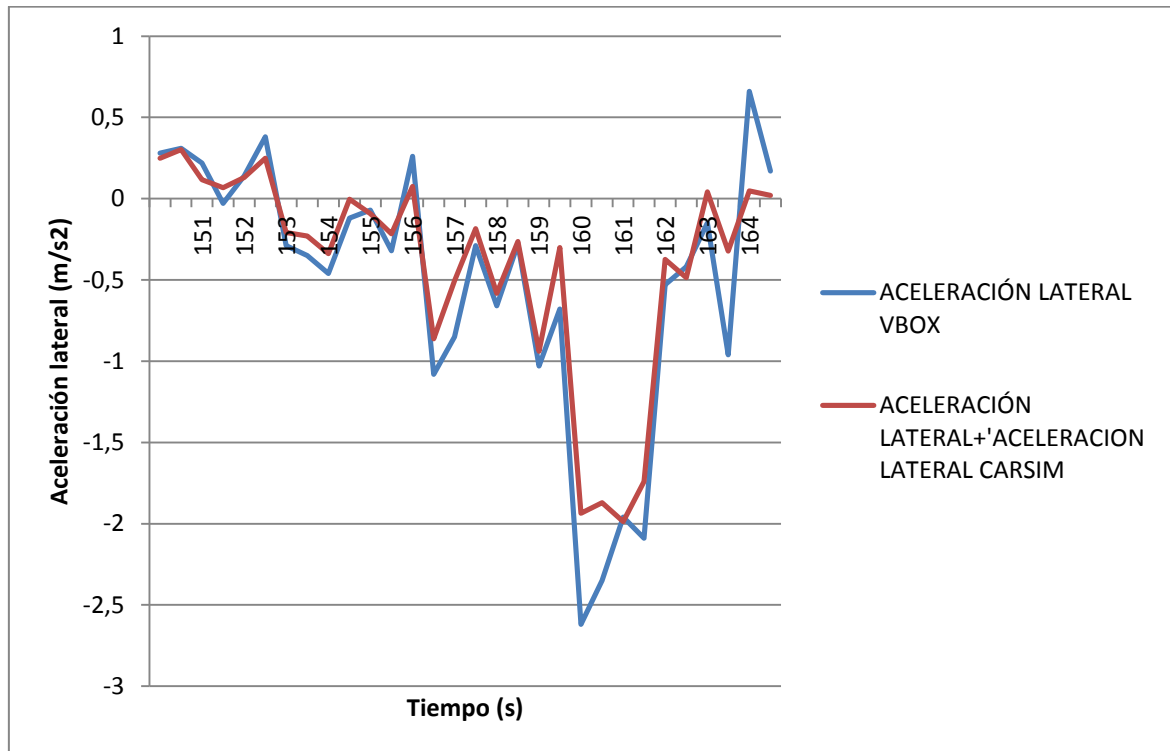
Durante el intervalo de tiempo que dura esta maniobra, se realiza una aceleración progresiva, véase gráfica 7.18. La maniobra se realiza a bajas velocidades y de manera continua.



Gráfica 7.19: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [150.5-165] segundos



Gráfica 7.20: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [150.5-165] segundos



*Gráfica 7.21: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [150.5-165] segundos*

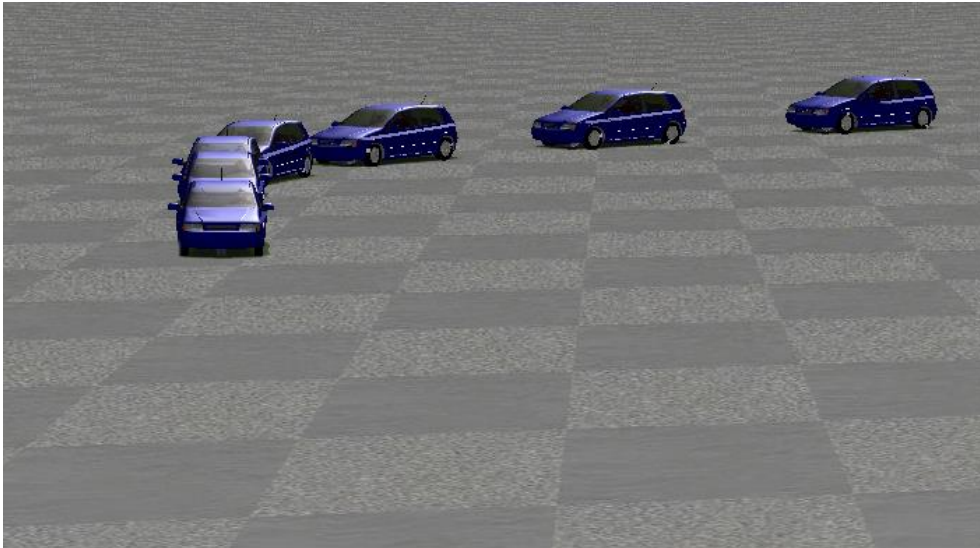
El Yaw Rate del vehículo simulado, véase gráfica 7.19, el ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.20 y la aceleración lateral del vehículo simulado, véase gráfica 7.21, mantiene una tendencia común con los resultados obtenidos del equipo *VBOX*.

Los resultados obtenidos de esta maniobra se mantienen cercanos a los valores reales.

#### Giro a izquierdas 90°

En este apartado el vehículo realiza una maniobra de giro hacia la izquierda con un ángulo de 90°. Lo primero que se presenta es una imagen del vehículo simulado realizando la trayectoria, ver imagen 7.5. Después, debido a la deceleración brusca que se realiza en el rango de tiempo, se representa mediante una tabla las variables que controlan la trayectoria del vehículo en el intervalo que se realiza la deceleración pronunciada, véase tabla 7.5. Para completar los resultados, se representa gráficamente la comparación entre los resultados obtenidos del parámetro Yaw Rate,

véase gráfica 7.22, del ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.23 y de la aceleración lateral, ver gráfica 7.24



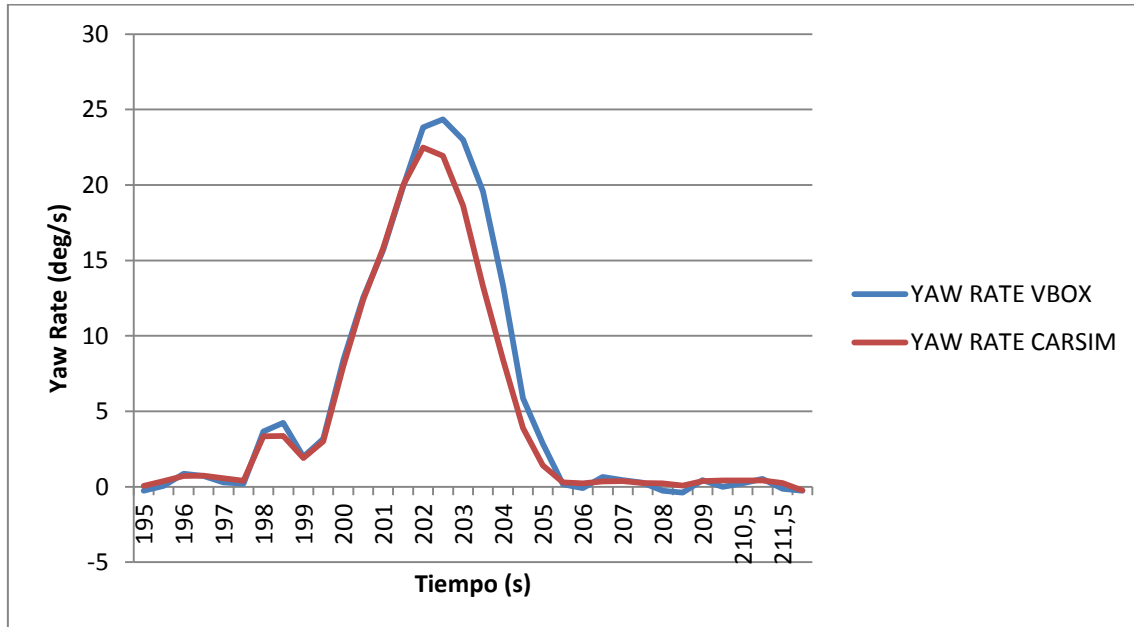
*Imagen 7.5: Giro hacia izquierda 90º*

Una vez se realiza el giro a izquierdas se aplica una deceleración y una aceleración posterior pronunciadas, manteniendo la trayectoria recta, véase tabla 7.5.

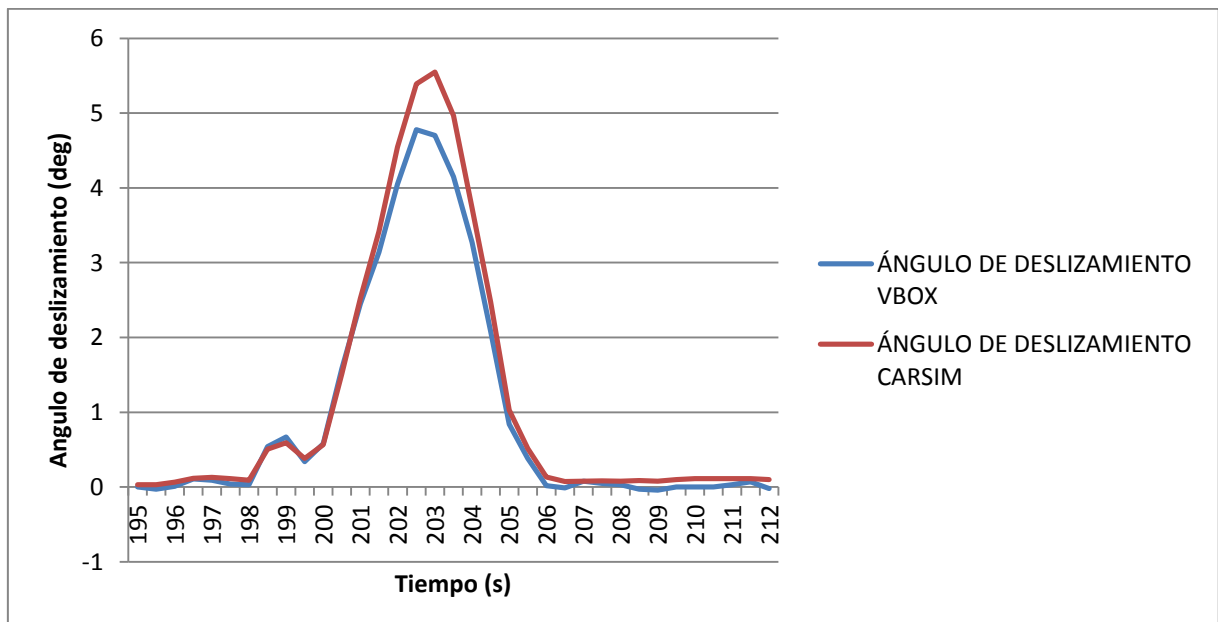
TIEMPO (s)	VELOCIDAD LONGITUDINAL VEHÍCULO (km/h)	STEERING (deg)
207,5	38,8	0
208	39,65	0
208,5	39,47	-1
209	0	1
209,5	0	1
210	0	1
210,5	32,15	1
211	30,5	1

*Tabla 7.5: Variables de entrada intervalo [207.5-211] segundos.*

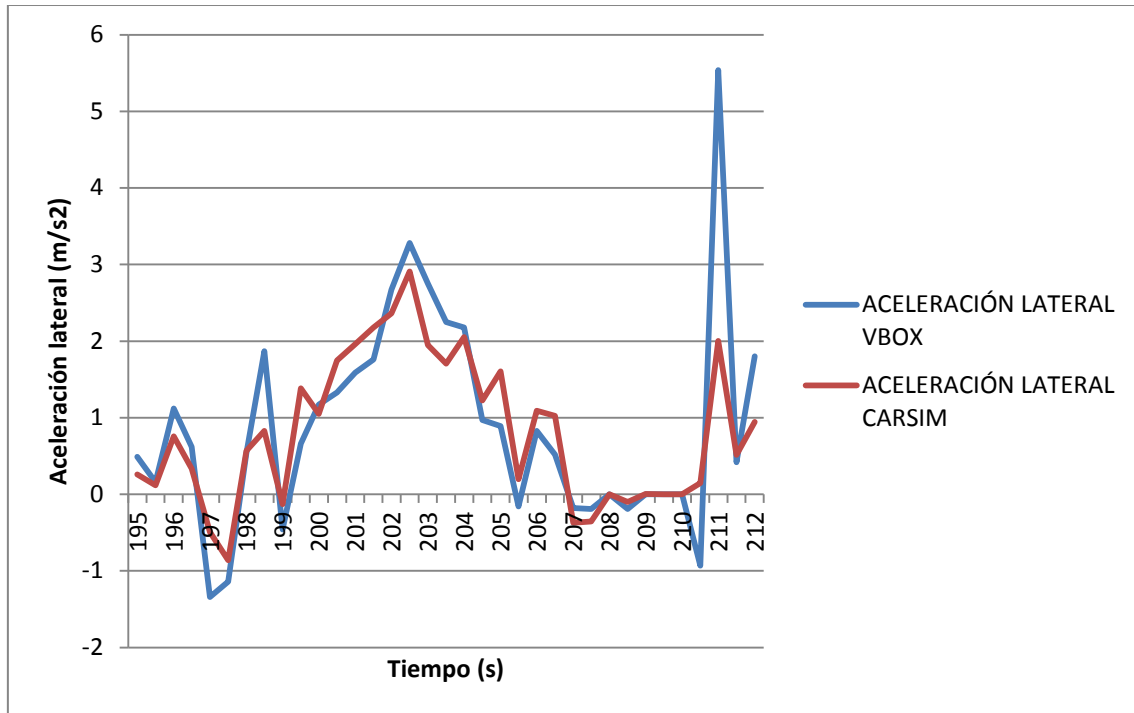
El giro a izquierdas se realiza manteniendo una aceleración uniforme. Una vez el vehículo vuelve a recuperar la trayectoria, se realiza una deceleración pronunciada, hasta detener el vehículo, tras lo cual se aplica una aceleración brusca, véase tabla 7.5.



Gráfica 7.22: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [195-212] segundos



Gráfica 7.23: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [195-212] segundos



*Gráfica 7.24: Comparación valores aceleración lateral VBOX con aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [195-212] segundos*

En las gráficas 7.22 y 7.23 se representan la comparación de los parámetros Yaw Rate y aceleración lateral, obteniendo valores entre sí muy cercanos, realizando una simulación en este intervalo similar a la prueba real.

El estudio de la aceleración lateral muestra una tendencia común a lo largo de toda la maniobra. Durante la aceleración brusca la aceleración lateral del vehículo real genera un pico que no sigue el parámetro de *CarSim*. El parámetro de la aceleración lateral, no alcanza la precisión alcanzada en los otros parámetros.



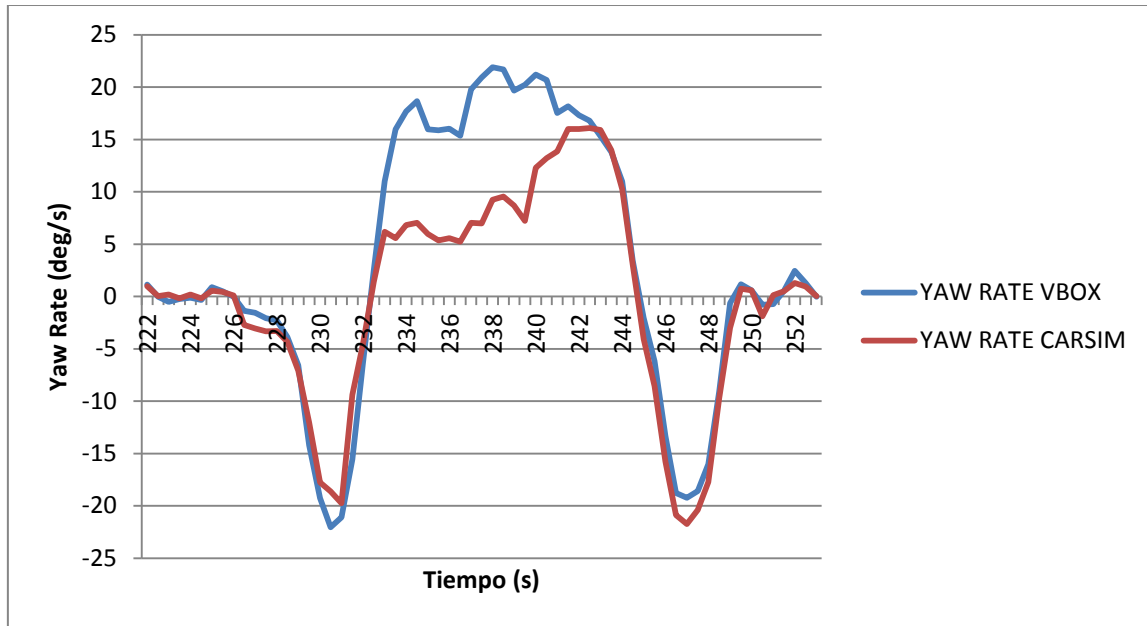
### Paso por rotonda

Durante el intervalo de tiempo, el vehículo se introduce por una rotonda saliendo en la salida que tiene enfrente sin variar su dirección y sentido. El primer resultado que se representa es la trayectoria seguida por el vehículo durante la maniobra mencionada, véase imagen 7.6. Para cerrar los resultados de este apartado se representan gráficamente la comparación de los parámetros de salida estudiados; Yaw Rate, véase gráfica 7.25, ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.26 y aceleración lateral, ver gráfica 7.27.

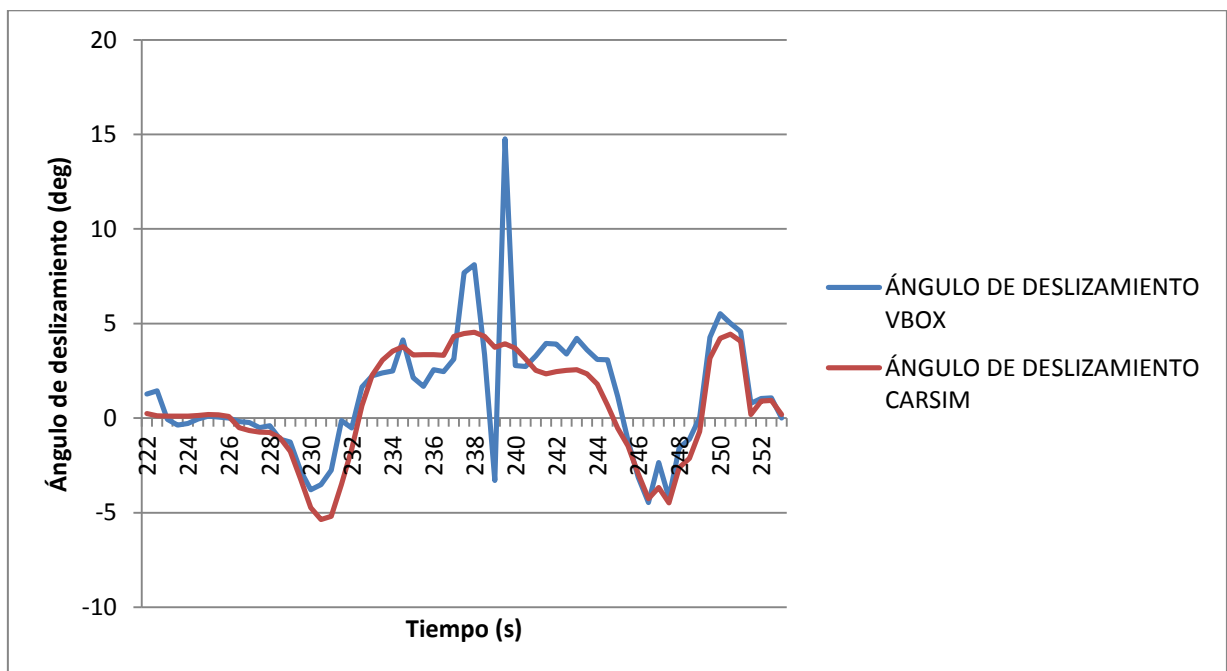


*Imagen 7.6: Paso por rotonda*

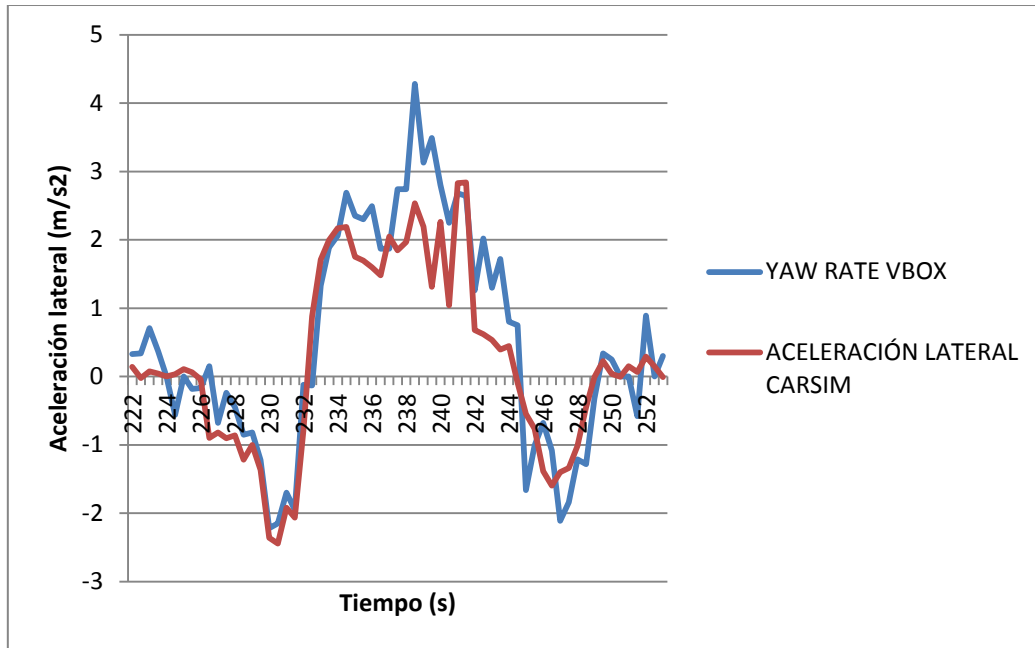
Durante este intervalo se realizan cambios en la velocidad de manera progresiva, sin realizar ningún tipo de movimiento brusco.



Gráfica 7.25: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [222-253] segundos



Gráfica 7.26: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [222-253] segundos



*Gráfica 7.27: Comparación valores aceleración lateral VBOX con aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [222-253] segundo*

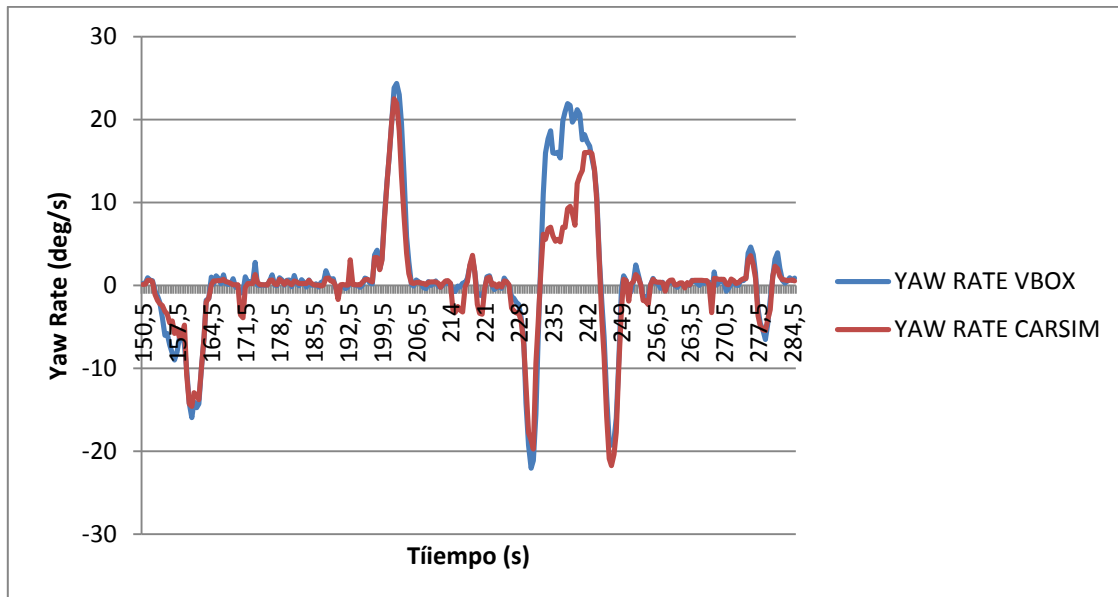
Los valores obtenidos de los parámetros Yaw Rate, ver gráfica 7.25, ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.26 y aceleración lateral, véase gráfica 7.27 en este tramo de la simulación, mantienen una misma tendencia que las mediciones de la prueba real sin alcanzar la misma precisión que en otros casos de estudio.

Respecto a la variable del ángulo de deslizamiento del vehículo sufre una variación en el tramo central de la maniobra, donde los valores medidos mediante VBOX generan una serie de picos.

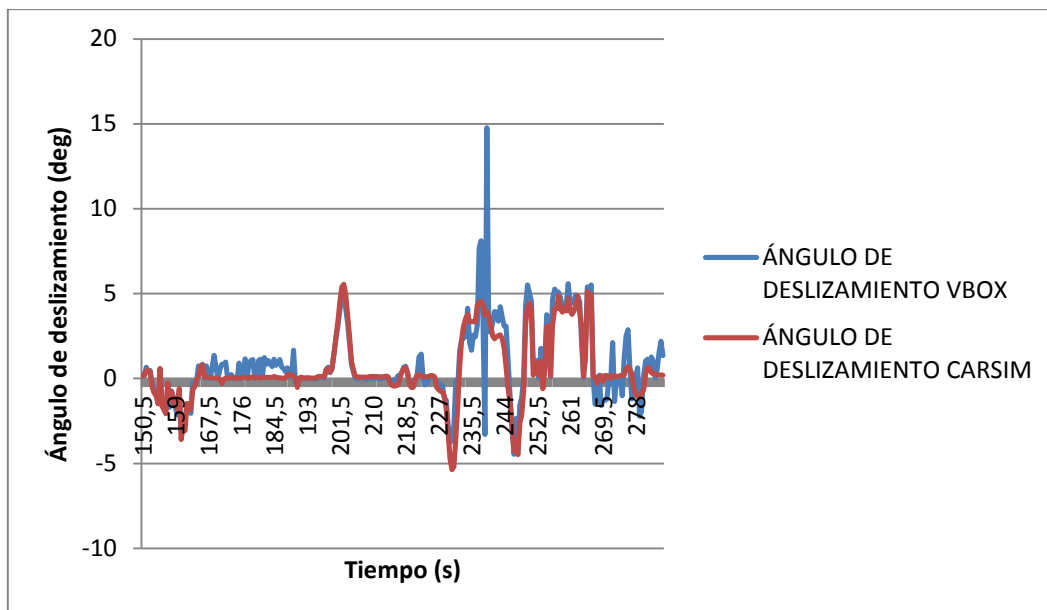
En este intervalo la situación, mantiene la tendencia, pero con variaciones en ciertos tramos del periodo.

### Recorrido completo caso de estudio 2.

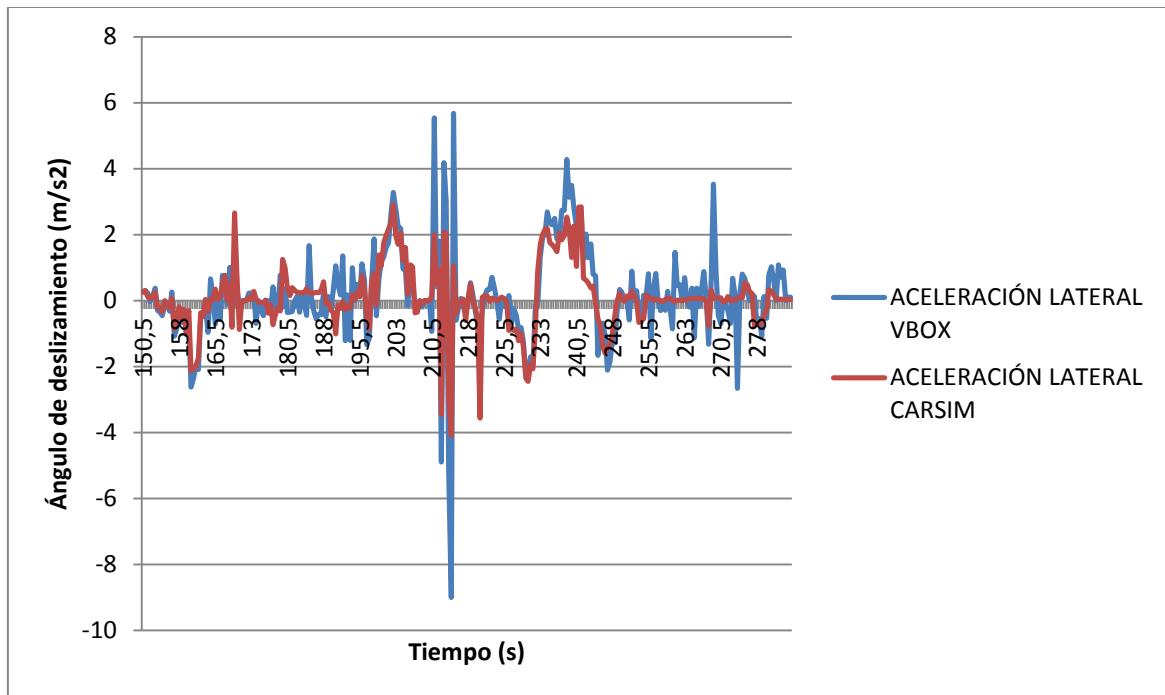
Para cerrar el segundo caso de estudio, se representan gráficamente las comparaciones de los parámetros de salida Yaw Rate, véase gráfica 7.28, ángulo de deslizamiento 7.29 y aceleración lateral, véase gráfica 7.30.



*Gráfica 7.28: Comparación Yaw Rate caso de estudio 2*



*Gráfica 7.29: Comparación Ángulo de deslizamiento caso de estudio 2*



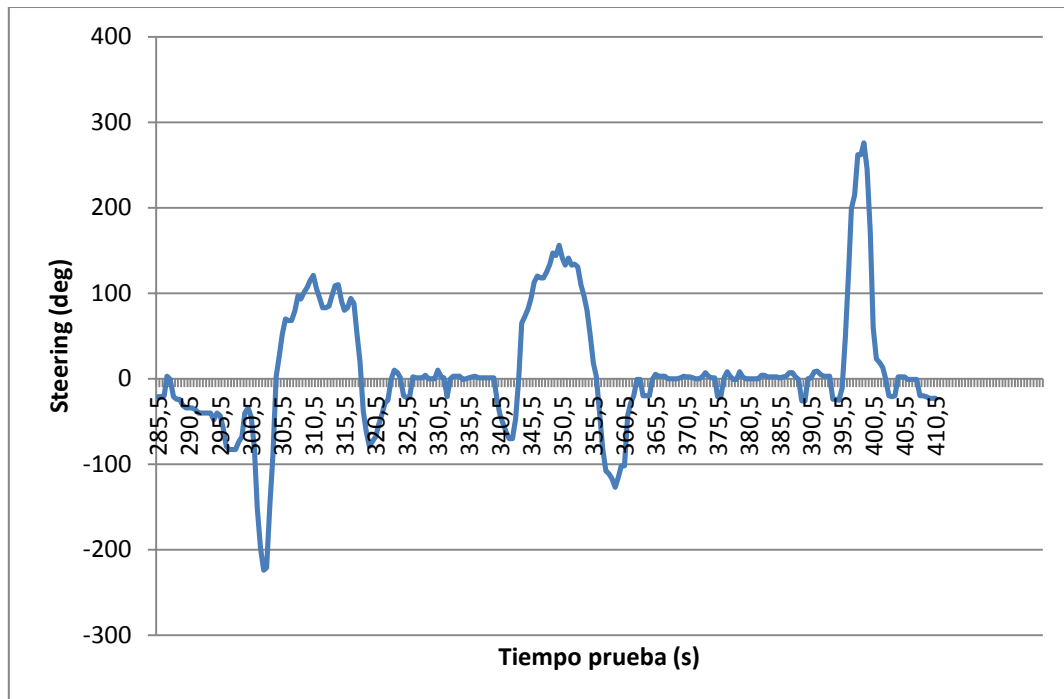
*Gráfica 7.30: Comparación aceleración lateral caso de estudio 2*

Los parámetros Yaw Rate y ángulo de deslizamiento obtienen una representación más precisa en ambos casos, véase gráfica 7.28 y gráfica 7.29.

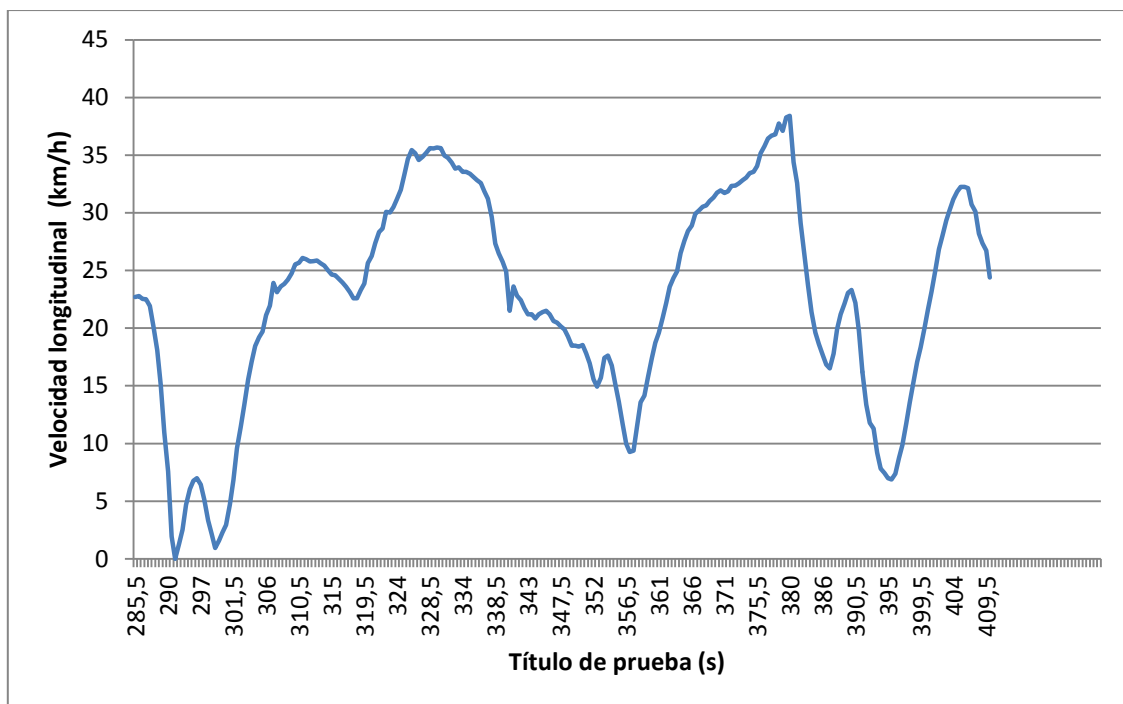
La comparación de la aceleración lateral, véase gráfica 7.30, muestra una tendencia común. Los valores medidos mediante *VBOX* generan una serie de picos durante todo el caso que el vehículo simulado no genera. Los resultados obtenidos respecto a este parámetro se encuentran relativamente próximos a las mediciones reales.

### 7.1.3 CASO DE ESTUDIO 3

El tercer caso de estudio cubre el rango de tiempos que comienza en el segundo 285.5 y que llega hasta el final de la simulación. Para empezar se representan gráficamente las variables que controlan la trayectoria de la simulación para realizar un mayor análisis de los movimientos realizados. Se representa gráficamente el steering del vehículo. Véase gráfica 7.31, y la velocidad longitudinal del vehículo, véase gráfica 7.32.



Gráfica 7.31: Ángulo steering caso de estudio 3



Gráfica 7.32: Velocidad longitudinal caso de estudio 3

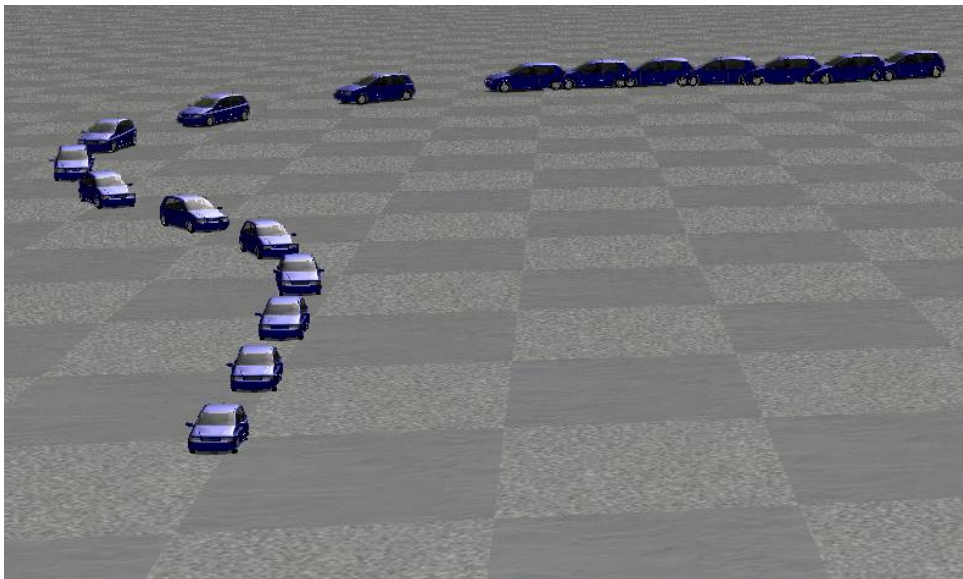
Para finalizar la simulación se realizan de nuevo tres acciones relevantes que se han de analizar.

Intervalo de Tiempo (s)	Manobra realizada
[285-326]	Giro rotonda 90º Caso 3.1
[335-366]	Giro rotonda 90º Caso 3.2
[393.5-405]	Giro a derechas 90º Caso 3

*Tabla 7.6: Caso 3 movimientos destacados*

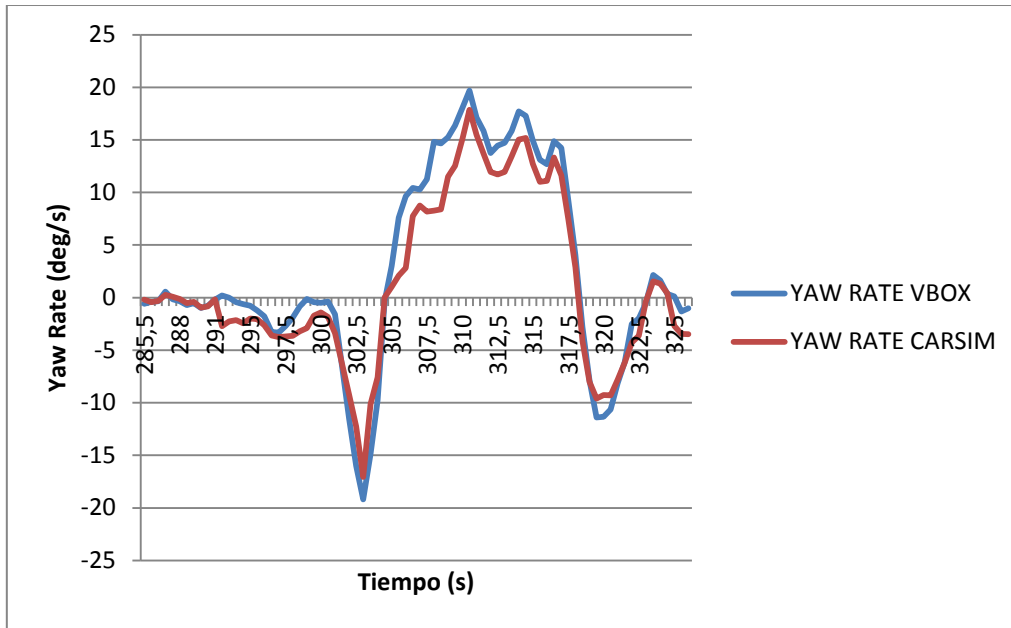
#### Giro en rotonda Caso 3.1

En el caso actual el vehículo realiza una rotonda realizando un giro de 90º. El primer resultado que se representa es una imagen de la simulación realizando dicha maniobra, véase imagen 7.7. Esta maniobra se realiza a velocidades bajas y uniformes, sin sobresaltos en ningún momento. Para cerrar este apartado se representan gráficamente la comparación de los resultados obtenidos del Yaw Rate, véase gráfica 7.33, del ángulo de deslizamiento, véase gráfica 7.34 y de la aceleración lateral, véase gráfica 7.35.

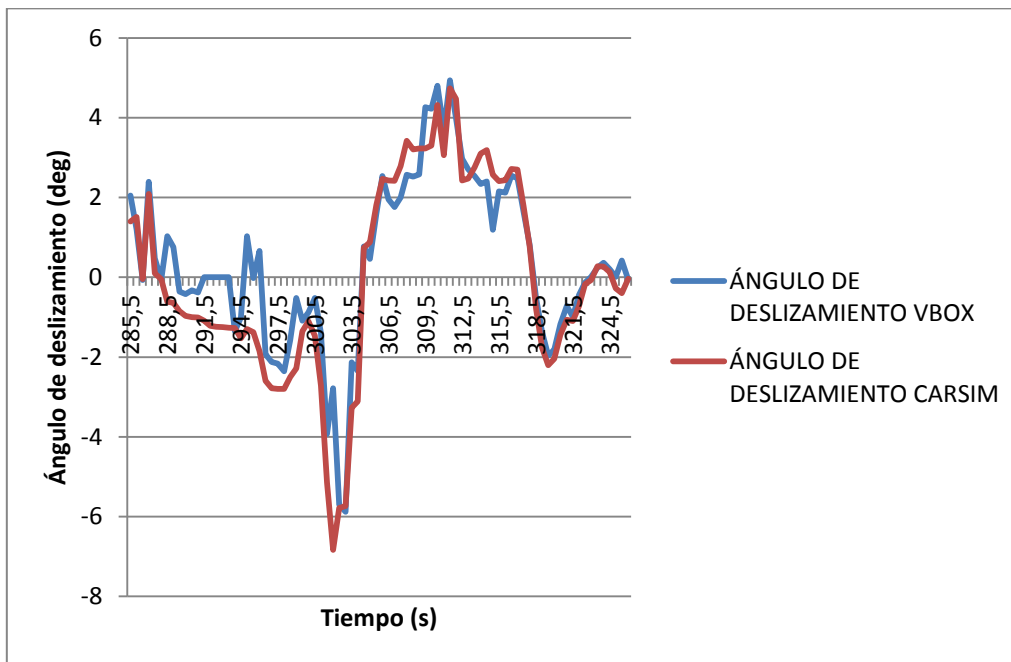


*Imagen 7.7: Giro rotonda 90º Caso 3.1*

La maniobra se realiza a velocidades bajas, véase gráfica 7.32, sin cambios bruscos. Por lo tanto se realiza una maniobra de giro en rotonda sin giros de volante ni cambios de velocidad pronunciados, manteniendo la trayectoria de manera uniforme.

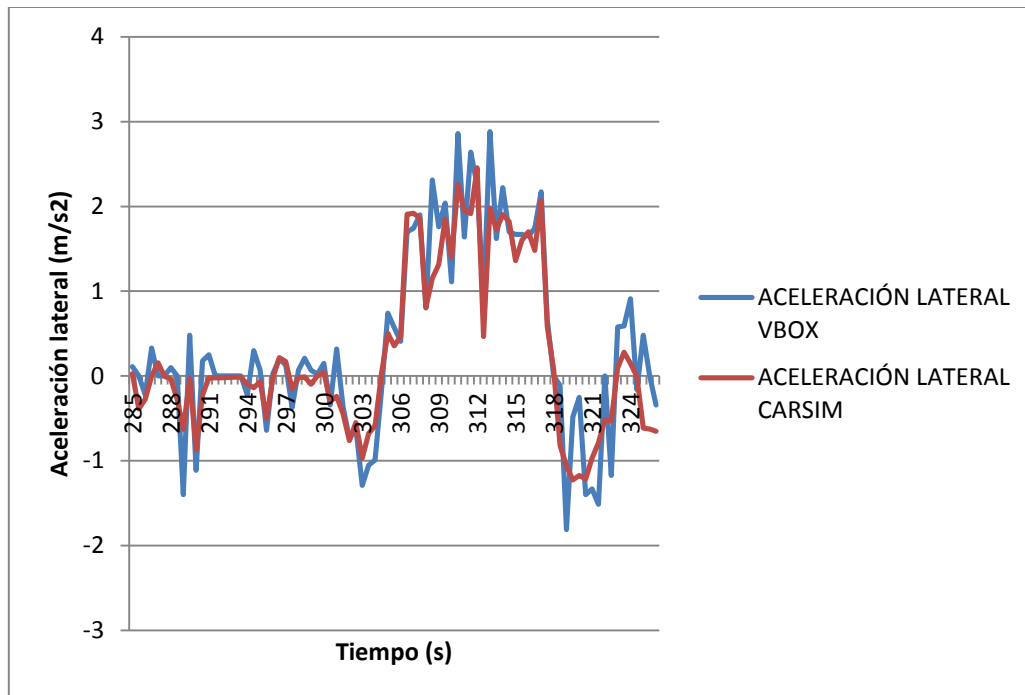


Gráfica 7.33: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [285-326] segundos



Gráfica 7.34: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [285-326] segundos





*Gráfica 7.35: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [285-326] segundos*

El estudio del parámetro Yaw Rate en este intervalo, véase gráfica 7.33, permite ver una continuidad en la tendencia de los valores obtenidos. Se alcanzan valores cercanos a las medidas obtenidas por el sistema de medición VBOX, por lo tanto el vehículo simulado tiene un comportamiento cercano al real teniendo en cuenta los resultados obtenidos del Yaw Rate.

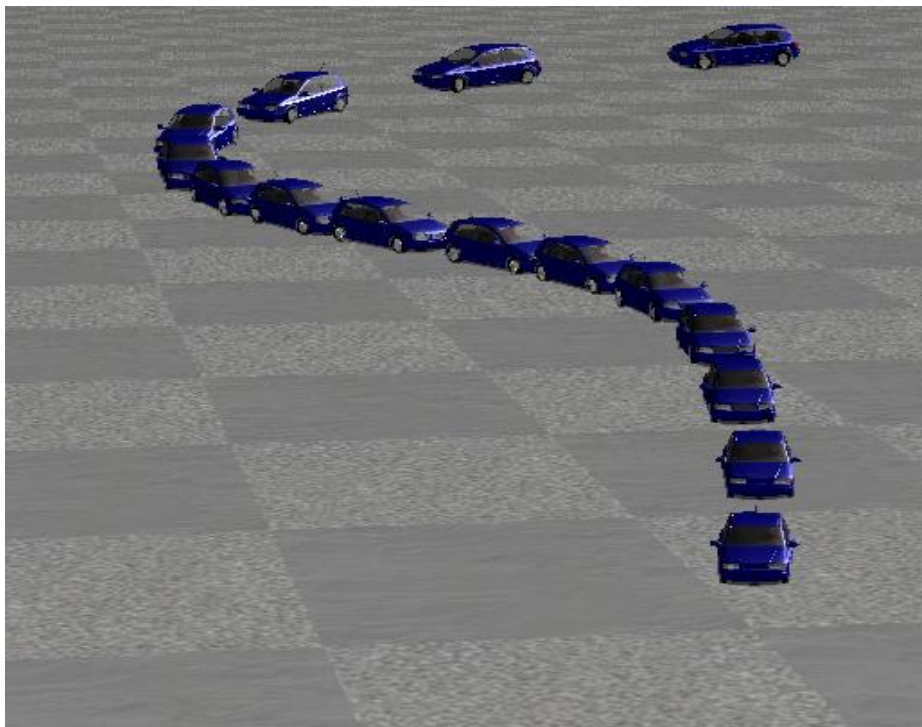
El ángulo de deslizamiento obtenido en la simulación en este tramo corresponde con la maniobra que se está realizando. Comparando los resultados entre pruebas, ver gráfica 7.34, se observa que los valores se mantienen cercanos a los obtenidos mediante la experimentación real.

La aceleración lateral obtenida, véase gráfica 7.35, mantiene la misma tendencia que los valores medidos mediante VBOX, obteniendo resultados cercanos a los reales.

En esta maniobra los parámetros estudiados se mantienen cercanos a los reales.

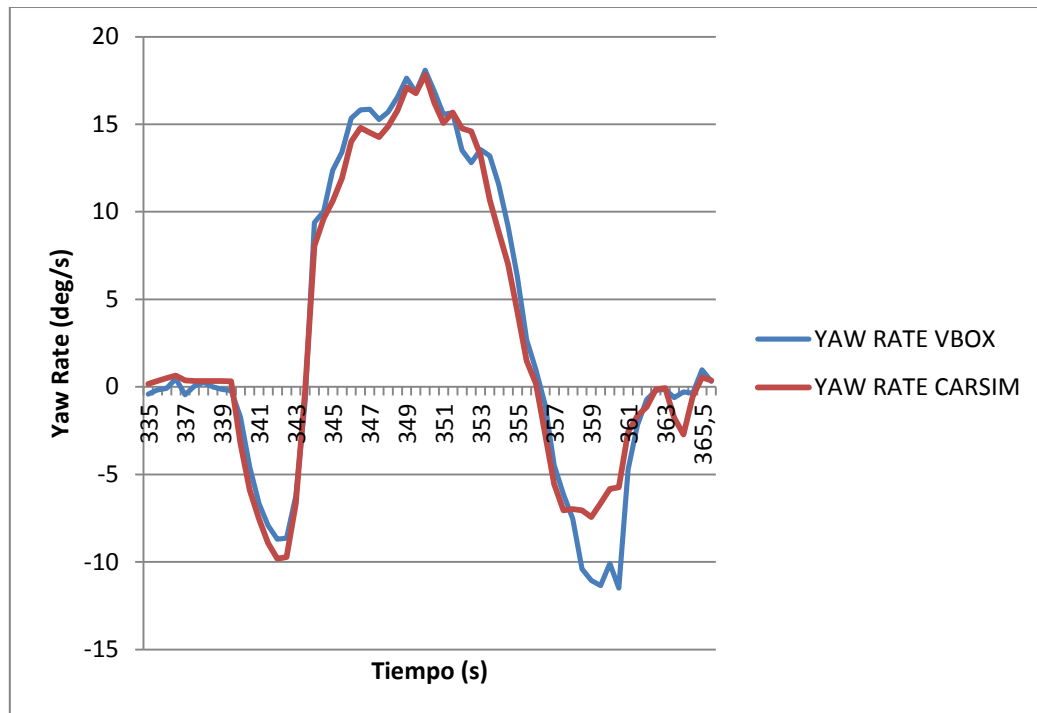
### Giro en rotonda Caso 3.2

El primer resultado que se representa es la trayectoria del vehículo durante este rango, la imagen se ha realizado a través del editor gráfico de la simulación, ver imagen 7.8. Para finalizar este apartado se presentan gráficamente los valores de las variables de salida obtenidos de la simulación, comparándolos con la medición de las pruebas reales, se representa el ángulo Yaw Rate, ver gráfica 7.36, el ángulo de deslizamiento en el intervalo de tiempo, ver gráfica 7.37 y la aceleración lateral, véase gráfica 7.38.

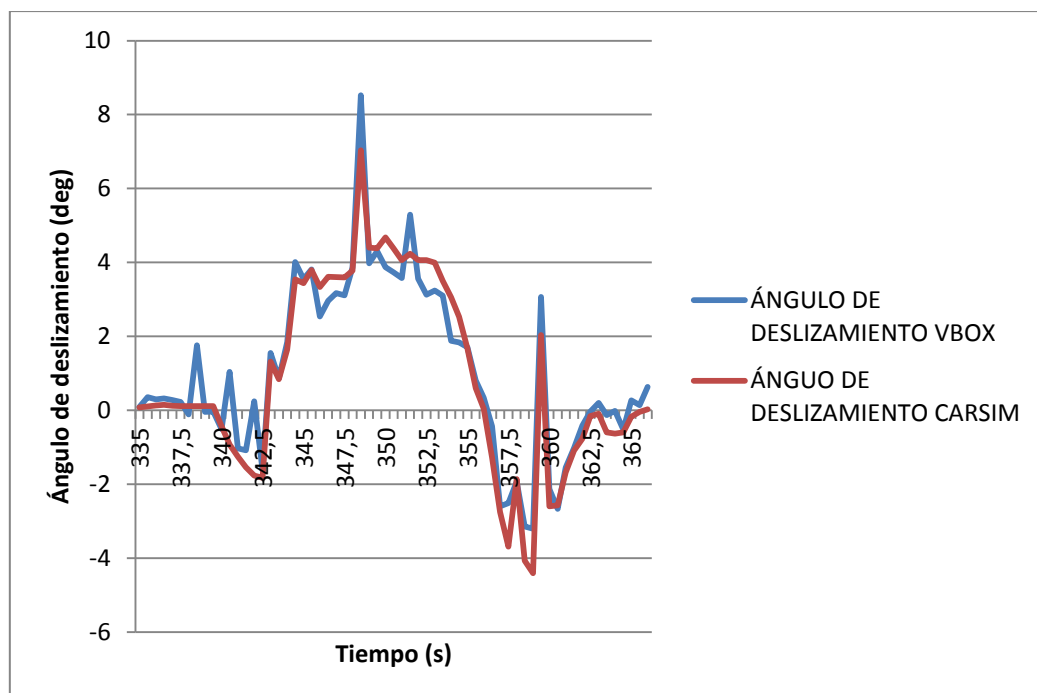


*Imagen 7.8: Giro rotonda 90º Caso 3.2*

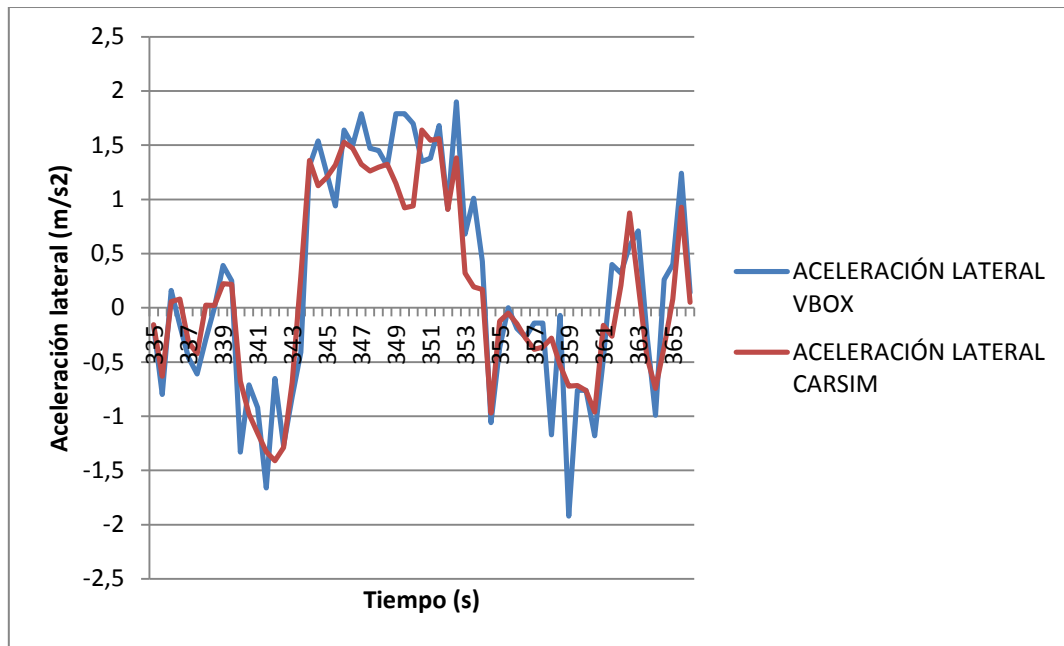
La maniobra realizada en este apartado, es un giro en rotonda manteniendo velocidades uniformes dentro de un rango de 20km/h y 30 Km/h. En este apartado los parámetros de salida se pueden ver afectados en mayor medida que en otros apartados anteriores, debido a la velocidad del vehículo.



Gráfica 7.36: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [335-366] segundos



Gráfica 7.37: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [335-366] segundos



*Gráfica 7.38: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [335-366] segundos*

El parámetro Yaw Rate durante esta maniobra obtiene valores muy cercanos entre la simulación y la prueba real, ver gráfica 7.36, obteniendo unos resultados óptimos teniendo en cuenta que la maniobra se realiza a una velocidad mayor que en otras ocasiones.

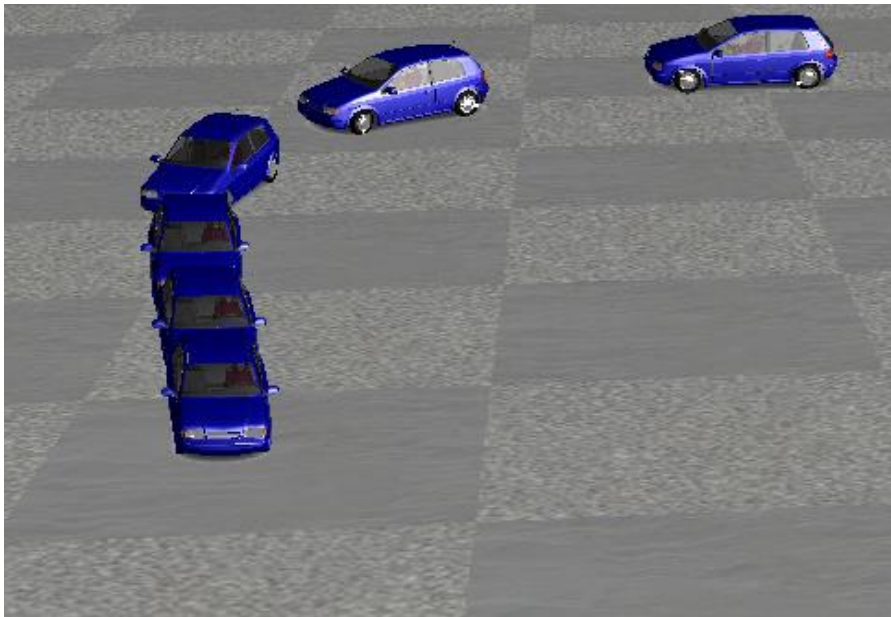
Analizando el ángulo de deslizamiento obtenido en la simulación, vease gráfica 7.37, se obtiene un comportamiento cercano al real.

El estudio de la aceleración lateral, vease gráfica 7.38, obtiene resultados correctos acorde con la maniobra que se está realizando. Comparando dichos resultados con la medición realizada en la prueba real se mantiene una tendencia común, pero varían ciertos picos que da la medición de VBOX.

Los parámetros de Yaw Rate y Ángulo de deslizamiento obtienen parámetros cercanos a la realidad. El parámetro de la aceleración lateral mantiene una tendencia común, con valores cercanos a los obtenidos mediante VBOX, sin alcanzar la precisión de los otros parámetros.

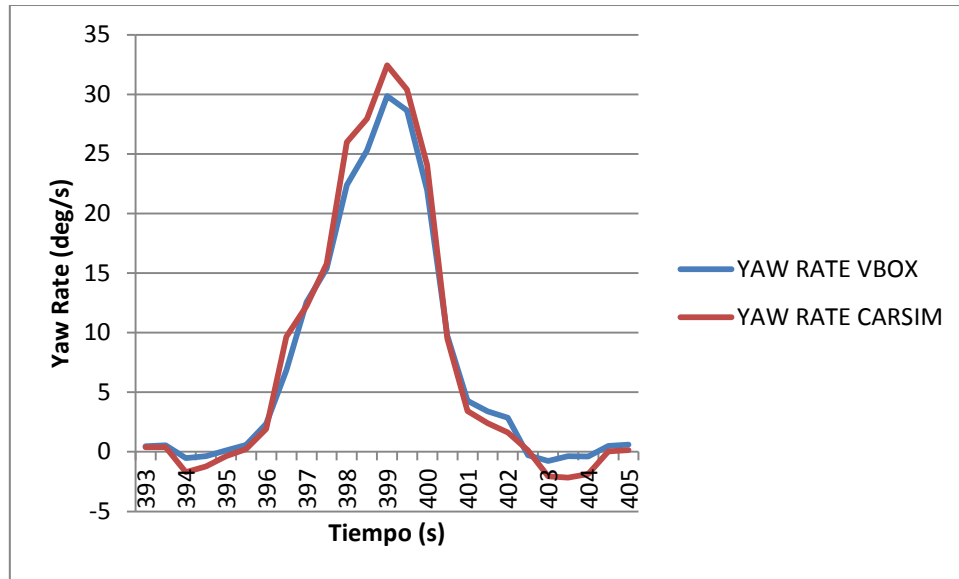
### Giro a izquierdas 90º Caso 3

El primer resultado que se representa en este apartado es una visualización de la maniobra obtenida de la simulación del vehículo, ver imagen 7.9. Se analiza las condiciones de la maniobra realizada. Para cerrar el apartado, se representa gráficamente la comparación de los resultados de los parámetros Yaw Rate, ver gráfica 7.39, ángulo de deslizamiento, ver gráfica 7.40 y aceleración lateral, véase gráfica 7.41.

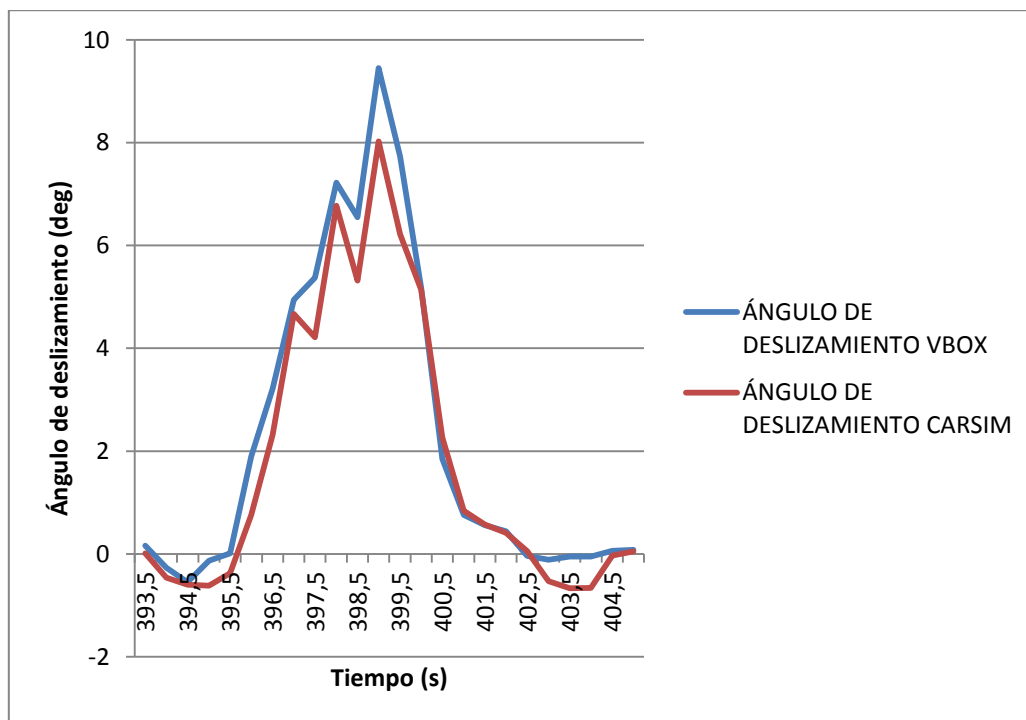


*Imagen 7.9: Giro hacia izquierda 90º Caso 3*

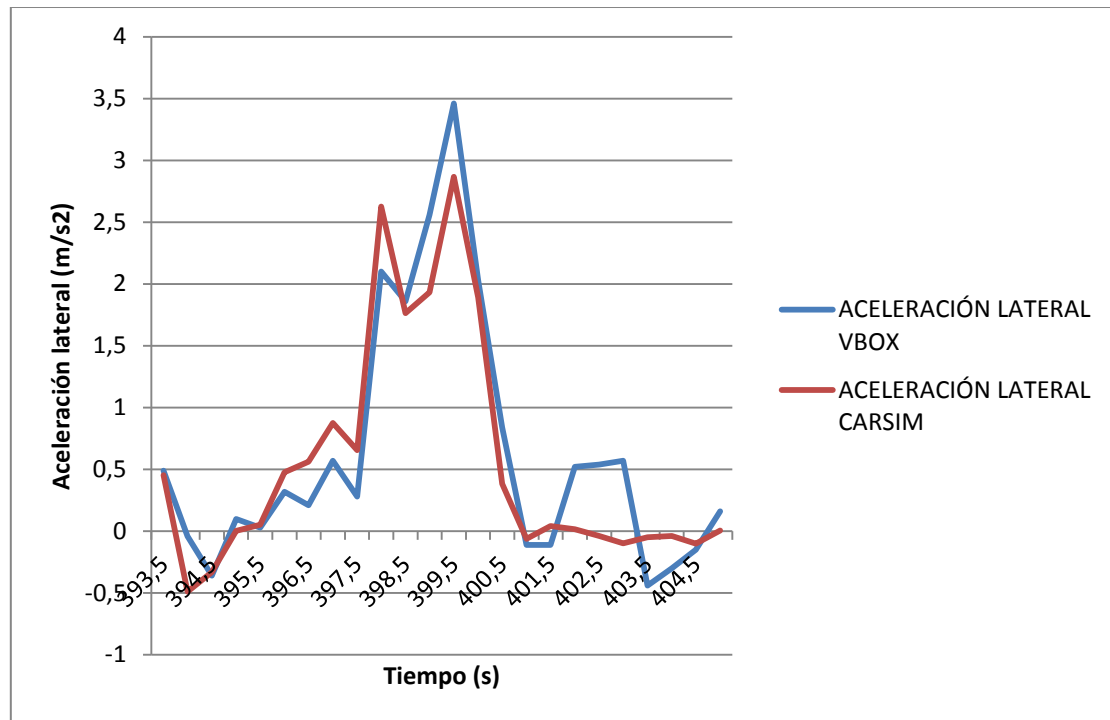
La maniobra analizada es un giro hacia la izquierda de 90º, este comienza durante una continuada y uniforme deceleración, realizando una suave aceleración una vez el vehículo a cambiado la dirección.



Gráfica 7.39: Comparación valores Yaw Rate VBOX con Yaw Rate CarSim intervalo de tiempo [393.5-405] segundos



Gráfica 7.40: Comparación valores Ángulo de deslizamiento VBOX con Ángulo de deslizamiento CarSim intervalo de tiempo [393.5-405] segundos



*Gráfica 7.41: Comparación valores Aceleración lateral VBOX con Aceleración lateral CarSim intervalo de tiempo [393.5-405] segundos*

Los valores obtenidos en la simulación de los diferentes parámetros muestran una tendencia correcta según la maniobra realizada. Los valores del Yaw Rate obtenidos en la simulación se mantienen similares a los valores reales, ver gráfica 7.39.

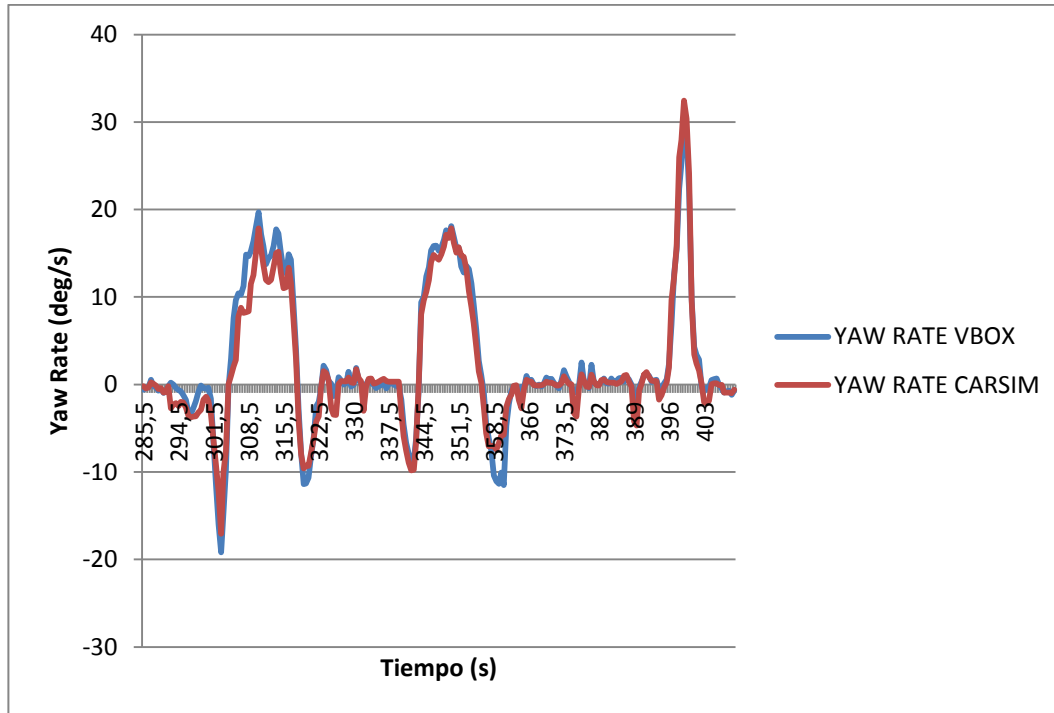
La comparación de los resultados del ángulo de deslizamiento en este intervalo, ver gráfica 7.40, demuestra que los resultados son próximos entre sí.

La aceleración lateral obtenida, vease gráfica 7.41, mantiene una tendencia cercana a los valores obtenidos en la medición de la experimentación real.

El vehículo mantiene unos parámetros cercanos a la realidad durante la realización de la maniobra.

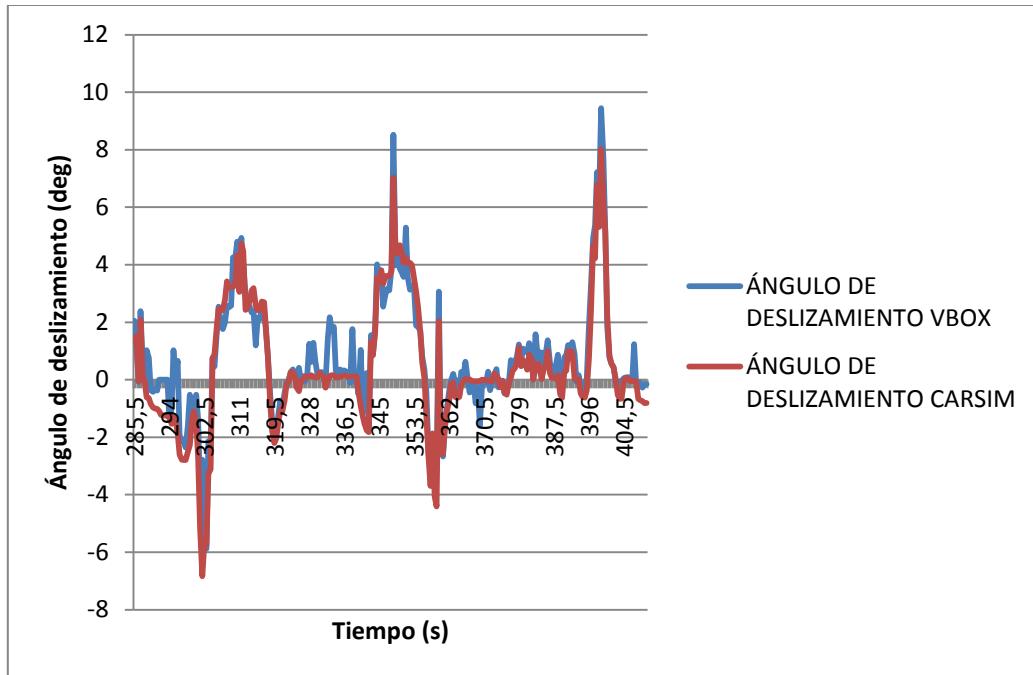
### Recorrido completo caso de estudio 3.

Para finalizar el análisis de este tercer tramo, se presentan la comparación de los valores obtenidos a lo largo del conjunto del tramo, del Yaw Rate, ver gráfica 7.42, del ángulo de deslizamiento, ver gráfica 7.43 y de la aceleración lateral, véase gráfica 7.44.

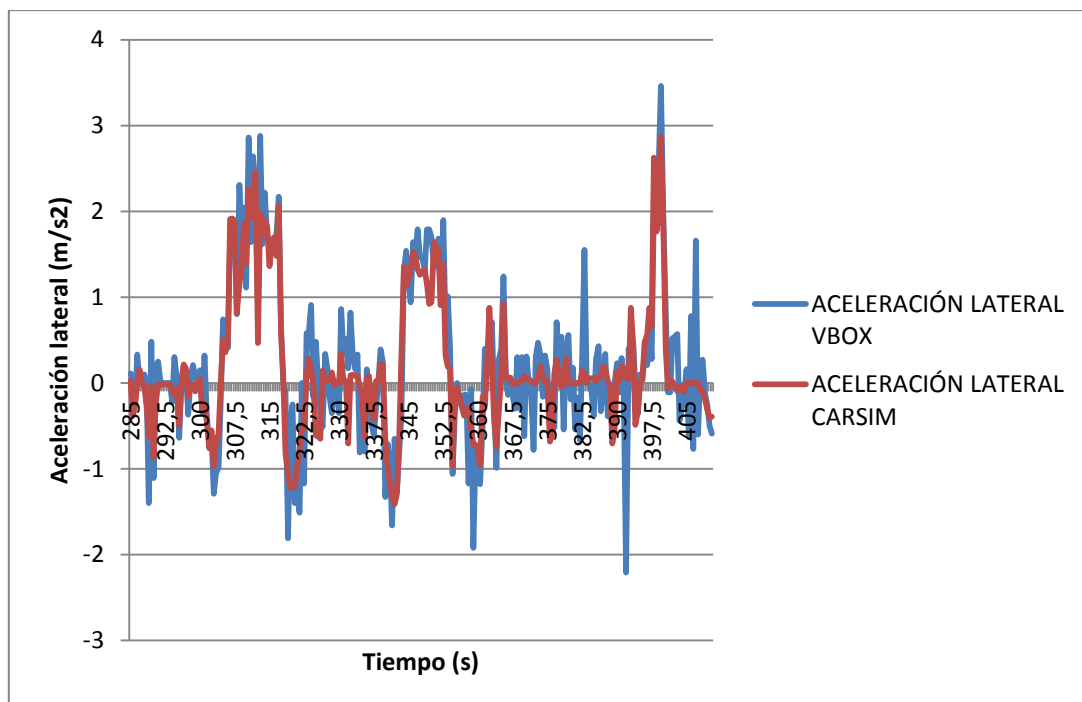


Gráfica 7.42: Comparación Yaw Rate caso de estudio 3





Gráfica 7.43: Comparación Ángulo de deslizamiento caso de estudio 3



Gráfica 7.44: Comparación Aceleración lateral caso de estudio 3

Analizando el tramo completo del análisis del parámetro Yaw Rate, ver gráfica 3.42, se observa una convergencia de los valores obtenidos. Los valores obtenidos del ángulo de deslizamiento, ver gráfica 7.43, mantienen una tendencia común con valores cercanos entre sí. La aceleración lateral, véase gráfica 7.44, mantienen una tendencia común, con ciertas diferencias entre sí

## 7.4. DIFERENCIAS ENTRE LA PRUEBA REAL Y LA SIMULACIÓN REALIZADA

---

Entre las pruebas realizadas en este proyecto se obtienen ciertas diferencias entre sí. Esto conlleva a que los resultados de la simulación en algunos puntos del recorrido, tengan mayores diferencias con respecto al comportamiento real del vehículo.

- **GIRO BRUSCO**, el comportamiento del vehículo simulado en este tramo se puede considerar como óptimo, debido a la cercanía de los resultados obtenidos.
- **CAMBIO DE SENTIDO EN ROTONDA**, los parámetros analizados obtienen resultados cercanos a los obtenidos mediante el sistema de medición VBOX. La simulación realiza una respuesta óptima para esta maniobra según los parámetros Ángulo de deslizamiento y aceleración lateral. El parámetro Yaw Rate obtiene valores más alejados de la realidad que las otras variables.
- **GIRO EN RONTODA 90º**, en esta prueba, los resultados obtenidos se mantienen próximos a las mediciones reales, la respuesta del vehículo simulado a esta maniobra es cercana a la respuesta obtenida del vehículo real no alcanzando la precisión obtenida en otros casos de estudio.
- **GIRO A DERECHAS 90º**, la respuesta obtenida al comportamiento del vehículo en la simulación, no alcanza la semejanza necesaria como para poder tomar el resultado como óptimo.

- **GIRO A IZQUIERDAS 90º**, en este tramo, los parámetros Yaw Rate y ángulo de deslizamiento tienen un comportamiento similar a los parámetros obtenidos del vehículo real. La aceleración lateral del vehículo simulado mantiene una tendencia común con los valores obtenidos en *VBOX*, sin incluir un pico que difiere entre sí. El comportamiento respecto al giro hacia la izquierda realizado es similar al obtenido en la prueba, teniendo una leve diferencia en el parámetro de la aceleración lateral.
- **PASO POR ROTONDA**, el vehículo tiene un comportamiento cercano a la realidad. Los parámetros Yaw Rate, aceleración lateral y ángulo de deslizamiento obtenidos en la simulación, mantienen la misma tendencia que las mediciones de *VBOX*. No se alcanza la precisión obtenida en otros casos en este tramo de la simulación. En este tramo es donde más influye parámetros como el coeficiente de rozamiento del vehículo, los neumáticos y la suspensión.
- **GIRO EN RONTODA 90º CASO 3.1**, en esta prueba, el vehículo mantiene la trayectoria de la rotonda de manera correcta, sin llegar a obtener una precisión suficiente como para obtener los mismos valores de los parámetros estudiados pero manteniendo una tendencia común. El parámetro Yaw Rate obtiene unos valores óptimos, mientras la aceleración lateral y el ángulo de deslizamiento sufren pequeñas variaciones a lo largo de la trayectoria.
- **GIRO EN RONTODA 90º CASO 3.2**, el giro aplicado en esta maniobra mantiene la trayectoria a lo largo de toda la rotonda. Se realiza una simulación similar a la realidad, teniendo leves diferencias en el parámetro de la aceleración lateral. La respuesta del vehículo a esta maniobra es óptima aunque no llega a la precisión obtenida en maniobras similares realizadas anteriormente.

- **GIRO A IZQUIERDAS 90º CASO 3**, el vehículo realiza el giro hacia la izquierda obteniendo parámetros con la tendencia correcta y cercana a la realidad. Los resultados obtenidos de los parámetros de estudio son cercanos a la realidad. La aceleración lateral no alcanza la precisión suficiente para considerar el parámetro como óptimo.

## 7.5. CÁLCULO DE ERRORES.

Para cuantificar la aproximación obtenida con la simulación realizada, se calcula el porcentaje de error de manera global y en cada uno de los tramos analizados para cuantificar las zonas donde la simulación puede diferir en mayor medida.

Para el cálculo de errores hay numerosos métodos. En el proyecto se emplea el método para calcular errores en función del tiempo obtenido en el Artículo Phenomenological model for magnetorheological dampers realizado por B.Spencer, S.Dyke, M.Sain, J.Carlson. Para el cálculo del error se emplea la siguiente fórmula:

$$E_t = \frac{\varepsilon_t}{\sigma_F} [1]$$

Donde:

$$\varepsilon_t = \sum_i^n (F_{exp} - F_{sim})^2 [2]$$

$$\sigma_F = \sum_i^n (F_{exp} - \mu_f)^2 [3]$$

- $F_{exp}$ : son los valores obtenidos por VBOX.
- $F_{sim}$ : son los valores obtenidos por la simulación.
- $\mu$ : es la media de los valores obtenidos por VBOX

Sustituyendo las ecuaciones [2] y [3] en [1] podemos obtener el porcentaje de error para cada uno de los parámetros.

Los errores se muestran divididos según los tres casos en los que se ha dividido el análisis de la prueba. Los errores obtenidos para el caso 1 se muestran en la tabla 7.7. Los errores obtenidos para el caso 2 se muestran en la tabla 7.8 y por último los errores obtenidos para el caso 3 se muestran en la tabla 7.9.

	ÁNGULO DE DESLIZAMIENTO (%)	YAW RATE (%)	ACELERACIÓN LATERAL (%)
CASO 1	28.35	30.05	55.63
GIRO BRUSCO	18	22.89	23.42
CAMBIO DE SENTIDO EN ROTONDA	25.21	41.6	28.95
GIRO EN ROTONDA 90º	43.22	25.6	37.34

*Tabla 7.7: Errores obtenidos Caso 1*

	ÁNGULO DE DESLIZAMIENTO (%)	YAW RATE (%)	ACELERACIÓN LATERAL (%)
CASO 2	42.27	38.15	55.43
GIRO A DERECHAS 90º	28.8	29.05	28.9
GIRO A IZQUIERDAS 90º	18.13	21.21	55.84
PASO POR ROTONDA	39.34	46.12	46.54

*Tabla 7.8: Errores obtenidos Caso 2*

	ÁNGULO DE DESLIZAMIENTO (%)	YAW RATE (%)	ACELERACIÓN LATERAL (%)
CASO 3	27.96	21.44	45.37
GIRO EN ROTONDA 90º, CASO 3.1	39.87	24.76	35.43
GIRO EN ROTONDA 90º, CASO 3.2	27.6	17.255	38.64
GIRO A IZQUIERDAS 90º, CASO 3	22.45	14.96	36.42

*Tabla 7.9: Errores obtenidos Caso 1*

Para finalizar se calcula el porcentaje de error de la simulación completa para cada una de las variables analizadas.

$$\varepsilon_{Yaw Rate} = 35.19 \%$$

$$\varepsilon_{\text{Ángulo de deslizamiento}} = 28.75 \%$$

$$\varepsilon_{\text{Aceleración lateral}} = 53.25 \%$$

Destacar que se está calculando porcentajes de error a lo largo de intervalos de tiempo. Los errores cometidos en ciertos puntos de la simulación se arrastran a lo largo de todo el intervalo, obteniendo errores mayores.

## CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y PROYECTOS FUTUROS

---

Este capítulo se dedica a hablar de la eficacia alcanzada en el proyecto. Comentando las posibles mejoras y los trabajos futuros que se pueden realizar a raíz de este estudio, mejorando la simulación obtenida.

### 8.1. CONCLUSIONES

---

El objetivo del proyecto es simular el comportamiento dinámico de un Toyota Prius, modelado mediante el software *CarSim*. Para ello se combina el programa *CarSim* y *Simulink* para obtener una simulación controlada mediante variables medidas durante pruebas reales realizadas al vehículo.

- Se alcanzó con éxito el objetivo de simular los programas CarSim y Simulink y simular la prueba real realizada previamente al vehículo.
- Gracias al grado de realismo del simulador CarSim y su alto grado de eficacia permite obtener unos resultados realistas del trabajo realizado. Además propone unas herramientas avanzadas para visualizar los resultados obtenidos.
- Se ha conseguido modelar el vehículo obteniendo resultados óptimos y cercanos a la realidad.
- En el proyecto se han expuesto diferentes casos en los que se puede comprobar la eficacia de la simulación realizada. Para un mayor análisis de los resultados se divide en tres diferentes casos. Las acciones realizadas en el caso de estudio 1 se muestran en la tabla 8.1. Las acciones realizadas en el caso de estudio 2 se muestran en la tabla 8.2 y por último las acciones realizadas en el caso de estudio 3, se muestran en la tabla 8.3.

GIRO BRUSCO
CAMBIO DE SENTIDO EN ROTONDA
GIRO EN ROTONDA 90º

*Tabla 8.1: Acciones realizadas en Caso 1*

GIRO A DERECHAS 90º
GIRO A IZQUIERDAS 90º
PASO POR ROTONDA

*Tabla 8.2: Acciones realizadas en Caso 2*



GIRO EN ROTONDA 90º, CASO 3.1
GIRO EN ROTONDA 90º, CASO 3.2
GIRO A IZQUIERDAS 90º CASO 3

*Tabla 8.3: Acciones realizadas en Caso 3*

Con los resultados obtenidos se concluye que la simulación realizada tiene un alto grado de semejanza con la mayoría de las pruebas realizadas. Se han de tener en cuenta los desajustes que puede tener el sistema de medición VBOX a la hora de la medición de las variables, así como su propio ruido interno y error. Además de la dificultad de modelar ciertas partes del vehículo, como son la suspensión, el sistema de frenado o el comportamiento aerodinámico por la falta de datos, debido a la alta opacidad que se da en las compañías automovilísticas. Pese a ello se consigue una simulación con resultados óptimos.

Los porcentajes de error obtenidos en algunos casos son elevados, esto no quiere decir que el comportamiento del vehículo simulado difiera en gran medida de vehículo real. Se están calculando porcentajes de error a lo largo de una simulación, por lo que un error en un punto determinado arrastra los siguientes valores. Si no que manteniendo una tendencia y unos resultados cercanos, no se alcanza la suficiente precisión como para obtener un porcentaje de error bajo.

## 8.2 TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

---

El estudio del comportamiento dinámico de los vehículos es un tema en constante avance en la actualidad. El método empleado para modelar un vehículo que simule el comportamiento dinámico de un vehículo real obteniendo resultados cercanos a la realidad es a priori eficaz. Siguiendo esta línea de trabajo se puede conseguir depurar el vehículo modelado y obtener valores con un alto grado de realismo.

Se puede realizar un estudio más detallado del sistema de suspensión del vehículo, generando una mejor respuesta a los cambios de dirección, modificando los valores del Yaw Rate, del ángulo de deslizamiento o de la aceleración lateral. Así mismo, se puede mejorar el sistema de frenado, el modelado de los neumáticos o el comportamiento aerodinámico del vehículo. A través de prueba y error se puede conseguir optimizar el modelado.

Para controlar de manera completa el comportamiento del vehículo se han de realizar pruebas futuras con vehículos reales, realizando otro tipo de maniobras más críticas y comparando un mayor número de variables.

La simulación es un proyecto que cada vez crece más mejorando el realismo de los resultados obtenidos acercándolos en gran medida a la realidad. Esto permite realizar proyectos de investigación con una gran facilidad.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Mechanical Simulation. (s.f.). *Mechanical Simulation/CarSim*. Recuperado el 20 de 04 de 2015, de Mechanical Simulation/CarSim:  
<http://www.carsim.com/products/carsim/models.php>
- [2] Mechanical Simulation. (s.f.). *Mechanical Simulation/CarSim/Customers*. Recuperado el 28 de 04 de 2015, de Mechanical Simulation/CarSim/Customers:  
<http://www.carsim.com/company/customers/carsim.php>
- [3] Monserrat, J. c. (2008). Modelo de dinámica lateral de vehículo mediante Bond Graph. *Revista Ingenieria Industrial*, 36,37.
- [4] Rojas, G., & Arzola, N. (2013). Análisis del comportamiento dinámico de un vehiculo con suspensión independiente tipo paralelogramo deformable y barras de estabilidad transversal. *Facultad de Ingenieria Universidad Antioquia.*, 112-114.
- [5] Germán Filippini, N. N. (2005). *Estudio del comportamiento dinámico de vehiculos terrestres utilizando la técnica de Bond Graphs*. Buenos Aires.
- [6] EcuRed. (17 de 4 de 2012). Ecured. Recuperado el 20 de 4 de 2015, de [http://www.ecured.cu/index.php/Sistema\\_din%C3%A1mico](http://www.ecured.cu/index.php/Sistema_din%C3%A1mico)
- [7] Requena, C. C. (s.f.). *Estimación de Estados sobre modelos CAE. Aplicación dinámica vehicular*. Tesis Doctiral, Universidad de Oviedo, Oviedo.
- [8] Motorpasion. (16 de 10 de 2012). *Motorpasion*. Recuperado el 4 de 15 de 2015, de Motorpasion: <http://www.motorpasion.com/espaciotoyota/15-anos-de-toyota-prius-todo-sobre-el-hibrido-de-referencia>
- [9] Vbox Automotive. (s.f.). *Vboxautomotive*. Recuperado el 02 de 05 de 2015, de Vboxautomotive:  
<https://www.vboxautomotive.co.uk/~velobox/index.php/es/products/data-loggers/vbox-3i-dual-antenna#overview>

[10] Repositorio digital Universidad Politécnica Salesiana. (s.f.). Recuperado el 04 de 02 de 2015, de Repositorio digital Universidad Politécnica Salesiana.:

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1132/2/CAPITULO%20I.pdf>

[11] Esquivias Celedón, E. (18 de 07 de 2013). *Monografías*. Recuperado el 11 de 04 de 2015, de Monografías: <http://www.monografias.com/trabajos12/moma/moma.shtml>

[12] Urquía Moraleda, A. (s.f.). *Simulación*. Informática y Automática, Madrid.

[13] Univerisdad Nacional de Rosario. (s.f.). *Simulación computacional de dinámica vehicular*.

[14] Dinh, T. (s.f.). *ehow*. Recuperado el 05 de 05 de 2015, de [http://www.ehowenespanol.com/verificar-validar-modelo-matematico-como\\_476856/](http://www.ehowenespanol.com/verificar-validar-modelo-matematico-como_476856/)

[15] Ingenieria AutoAvance. (s.f.). *Auto Avance*. Recuperado el 22 de 04 de 2015, de <http://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/128-sensor-yaw-rate-sistema-rsc-ford/128-sensor-yaw-rate-sistema-rsc-ford>

[16] (s.f.).Alineación. (24 de 11 de 2007). Alineacionsena. Recuperado el 16 de 04 de 2015, de <http://alineacionsena.blogspot.com.es/2007/11/angulo-de-deslizamiento-toda-la-fuerza.html>

[17] Docsetools. (s.f.). Doctsetools. Recuperado el 13 de 04 de 2015, de [http://docsetools.com/articulos-utiles/article\\_119118.html](http://docsetools.com/articulos-utiles/article_119118.html)